

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Diseño sistema electrónico para detección de usuarios en entornos rurales a través de tecnología inalámbrica.



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Seán Grace Puy

Angel María Andueza Unanua

Pamplona, 19 de junio de 2018





## Resumen

El proyecto que se presenta trata de una implementación de un sistema de detección de personas en entornos rurales utilizando un sensor basado en el efecto Doppler y Arduino. Este sistema está destinado principalmente a llevar una contabilidad del número de personas que pasan por una zona.

El desarrollo del proyecto ha constado de la realización tanto del hardware como del software del sistema. Para el hardware, ha sido necesario diseñar un circuito de acondicionamiento con el objetivo de obtener una señal del sensor amplificada para poder ser leída con Arduino y además obteniendo una ganancia lineal en la banda de frecuencias deseada. Para el software, se ha desarrollado el código necesario para interpretar con Arduino la información obtenida del sensor.

Con todo esto se busca una alternativa a la utilización de otro tipo de tecnología más costosa para contabilizar gente o no tan optima en entornos rurales y aislados.

## Abstract

The aim of this Project is to develop a system that's able to detect people going through rural areas using a Doppler based sensor and Arduino. The main goal of the work is to have an account of the people going by a certain area.

The development of the project is being differenced in two parts. On one side we have the hardware design and on the other the software development. On the hardware side, the Doppler sensor needed a correct conditioning of its signal to be able to read it with Arduino. On the software side, all the necessary code for the analyse of the signal has been developed.

The intention with this system is to look for an alternative to other technologies that are more expensive or not as good for rural places.

## Laburpena

Lan honek Doppler efektuan oinarritutako sentsorea eta Arduino erabiliz landa eremutan pertsonak antzematea izango du helburu. Sistema honen xede nagusia eremu batean dabilen pertsonen kontaketa aurrera eramatea izango da.

Lan honen garapena bi zatitan banatu daiteke. Alde batetik elektronikaren diseinua egin behar izan da sentsorearen seinalea Arduinoren bitartez irakurri ahal izateko. Bestetik, seinale hori irakurtzen duen programazioa burutu da.

Guzti honekin landa inguruetan pertsonak kontatzeko merkeagoa edota egokiagoa den aukera eman nahi da.

## Lista de palabras clave

- Sensor
- Radar
- HB100
- Detección de personas
- Doppler
- Arduino

## Índice

Resumen.....	3
Abstract .....	4
Laburpena .....	5
Lista de palabras clave .....	6
1. Introducción .....	9
1.1 Conceptos básicos.....	9
1.1.1 Radar .....	9
1.1.2 Efecto Doppler.....	11
1.1.3 Sensor HB100 .....	12
1.1.3.1 Introducción y descripción del sensor.....	13
1.1.3.2 Características del sensor HB100 .....	13
1.1.3.3 Funcionamiento del módulo HB100.....	15
1.1.4 Arduino.....	16
1.1.4.1 Introducción .....	16
1.1.4.2 Arduino Nano .....	18
1.1.4.3 Arduino IDE .....	19
2. Objetivos .....	21
3. Metodología .....	22
4. Desarrollo del TFG .....	23
4.1 Documentación .....	23
4.2 Diseño del circuito de acondicionamiento.....	24
4.2.1 Circuito acondicionamiento adaptado.....	27
4.2.2 Medida de la velocidad .....	28
4.2.3 Medida de la amplitud .....	30
4.2.4 Adaptación para la lectura de las señales con Arduino .....	31
4.3 Montaje del circuito y análisis de su comportamiento en el laboratorio.....	32
4.3.1 Resultados obtenidos del montaje experimental .....	35
4.4 Diseño de la PCB.....	37
4.5 Diseño del software .....	42
5. Presupuesto .....	47
6. Resultados y discusión .....	48
6.1 Prueba numero 1.....	48
6.2 Prueba numero 2.....	50
6.3 Prueba numero 3.....	53
6.4 Discusión .....	55

7. Conclusiones.....	57
8. Líneas Futuras .....	58
Índice de figuras .....	59
Bibliografía .....	60
Anexos .....	61
Anexo I. Hoja de características del módulo HB100 .....	61
Anexo II. Hoja de aplicaciones del sensor HB100 .....	63
Anexo III. Hoja de especificaciones del circuito integrado LM324N .....	70
Anexo IV. Hoja de características TMA-0512D.....	74
Anexo V. Código programación lectura frecuencia en Arduino .....	77
Anexo VI. Código de programación final.....	78



## 1. Introducción

Hoy en día, es muy habitual encontrarse con detectores de presencia, ya sea para abrir una puerta automática o encender una luz. Pero no solo es interesante la detección de paso de personas para usos domóticos. Actualmente tener una contabilidad de los usuarios que acceden a ciertos espacios, saber el uso diario que se realiza sobre distintas zonas, o conocer la tendencia que tienen las personas al moverse en ciertos entornos puede llegar a ser interesante para muchas empresas o entidades.

Actualmente, existen distintos tipos de tecnología que permiten detectar presencia como por ejemplo mediante infrarrojos tipo PIR, mediante el procesado de imagen ya sean térmicas o en 3D o incluso existen tecnologías basadas en la detección de presencia utilizando las señales wifi que emiten los móviles. Estas últimas permiten incluso saber el recorrido que ha ido realizando la persona a través de un centro comercial utilizando los puntos de acceso que están distribuidos por todo el recinto.

Pero en el caso de querer realizar detección de personas en entornos rurales como caminos, nos encontramos con que los usos de estas tecnologías no son viables. Ya que o bien requieren un gran procesado de información como pueden ser los detectores basados en imágenes o no son tan fiables por el paso de animales por la zona. Una alternativa a estas tecnologías puede ser el uso de un sensor basado en el efecto Doppler mediante el cual se puede apreciar la velocidad de paso de un objeto con lo que es posible distinguir una persona, respecto al paso de una bicicleta u otro vehículo que pase a otra velocidad. Además, permite poder saber la dirección en la que se está moviendo lo que da la posibilidad de por ejemplo tener controlado el número de personas que se encuentran en un lugar.

### 1.1 Conceptos básicos

Para poder entender cómo funciona un sistema de detección basado en sensores de efecto Doppler hace falta comprender primero ciertos conceptos fundamentales previos.

#### 1.1.1 Radar

La creación del radar o el uso de sistemas de radar como tal se retrotrae a los años 30. Pero para ver los orígenes del mismo hay que irse hasta los 1880s cuando empezaron a investigar la radiación electromagnética.

En 1886, Heinrich Hertz demostró de manera práctica las leyes de reflexión de las ondas de radio, para ello se basó en las ecuaciones de Maxwell que James Maxwell había desarrollado en 1864. A principios del siglo XIX concretamente en 1904, Christian Hülsmeyer patentó un sistema de navegación y detección de obstáculos para barcos. [1]

A partir de entonces, se comenzaron a desarrollar sistemas de detección radar para usos militares. Varios empezaron simultáneamente a investigar en la detección de aviación. En el año 1922 se logró la primera detección de un barco de madera utilizando un radar basado en las interferencias para una Onda continua utilizando un transmisor y un receptor separados. [2]

La primera detección de un avión no sucedió hasta junio de 1930, cuando L.A. Hyland que trabajaba para el laboratorio naval de investigación de Estados Unidos. Al principio era capaz de detectar un avión a una distancia de 2 millas, pero para 1932 ya tenían un sistema capaz de detectar aviones a 50 millas de distancia. [2]

Después de la guerra el uso del radar ha continuado hasta hoy en día, pero con distintas aplicaciones como pueden ser el control de tráfico aéreo, la detección de precipitaciones, o controles de velocidad para automóviles.

La ecuación de radar nos indica la densidad de potencia  $P_d$  en un punto dado a una distancia  $R$  de una fuente radiada mediante una antena isotrópica con una potencia [3]

$$P_d = \frac{P_t}{4 * \pi * R^2} \quad (1)$$

Pero el hecho de radiar en todas las direcciones es un desperdicio, por lo que en los radares es conveniente utilizar antenas directivas que nos permitan radiar únicamente en una dirección deseada. De esta manera se obtiene una ganancia en densidad denominada  $G$ . Añadiendo este factor a la ecuación (1) tenemos,

$$P_d = \frac{P_t * G}{4 * \pi * R^2} \quad (2)$$

Cuando la energía descrita en la ecuación (2) impacta contra un objeto, la mayor parte es absorbida, pero parte de ella es reflejada y vuelve en la dirección del radar. Cada objeto de distinto tamaño y material reflejara una cantidad de energía diferente. Esta cantidad es la sección radar equivalente del objeto,  $\sigma$ . Por tanto, teniendo en cuenta este factor, nos queda que la potencia reflejada

$$P_{rf} = \frac{P_t * G * \sigma}{4 * \pi * R^2} \quad (3)$$

Pero ahora hay que volver a tener en cuenta, que se refleja en todas direcciones como ocurría inicialmente, por lo que la potencia recibida nos queda de la siguiente manera

$$P_d = \frac{P_t * G * \sigma}{(4 * \pi * R^2)^2} \quad (4)$$

Por último, hay que tener en cuenta que porcentaje de la señal reflejada capta la antena. Este factor viene dado por el área efectiva de la antena receptora.

$$P_d = \frac{P_t * G * \sigma * A_c}{(4 * \pi * R^2)^2} \quad (5)$$

### 1.1.2 Efecto Doppler

Cuando una onda incide directamente contra un objeto o persona que se encuentra en movimiento, esta retorna con una frecuencia que es directamente proporcional a la velocidad relativa con la que se está moviendo respecto a la fuente. Un claro ejemplo de este efecto es cuando un observador que se encuentra parado junto a la carretera va escuchando el sonido que genera un coche al acercarse. Se puede apreciar una variación del sonido debido al cambio que hay en la frecuencia con la que llega la señal. Esta variación de frecuencia es llamada Frecuencia Doppler. [4]

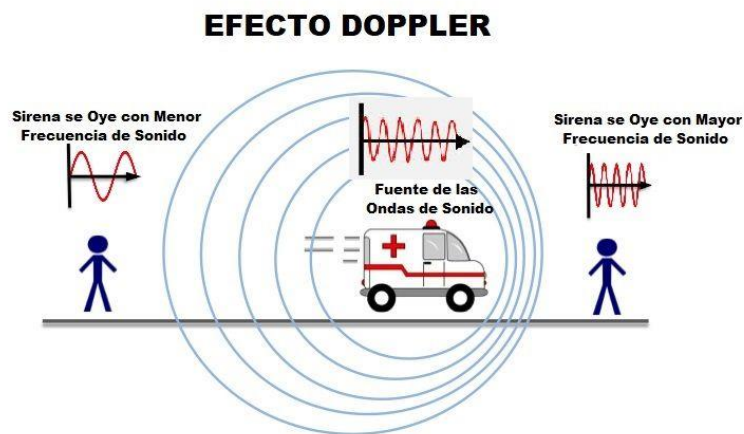


Figura 1. Representación de una onda acústica en movimiento [5]

El efecto Doppler en un sistema de medición de velocidad se puede ver como una fuente que emite una señal a una frecuencia y que tras rebotar con un objeto en movimiento tiene una variación de frecuencia proporcional a la velocidad con la que se mueve. Considerando que la señal que se transmite puede representarse como

$$X_t(t) = A \cos(2\pi f t) \quad (6)$$

nos queda una señal recibida

$$X_r(t) = B \cos(2\pi f t - \vartheta) \quad (7)$$

donde  $A$  y  $B$  son constantes y  $\vartheta$  es el desfase debido al retardo de propagación que puede describirse como

$$\vartheta = 2\pi \frac{2r}{\lambda} \quad (8)$$

donde  $r$  es la distancia hasta el objeto y  $\lambda$  la longitud de onda de la señal transmitida. Si el objeto se encuentra en movimiento sobre un periodo corto de tiempo nos queda que  $r$  se puede representar tal que [4]

$$r(t) = r_0 - vt \cos(\alpha) \quad (9)$$

donde  $r_0$  es la distancia en  $t = 0$ ,  $\alpha$  es el ángulo entre la dirección de movimiento del objeto y el transmisor y  $v$  la velocidad de movimiento. De esta manera la ecuación (7) nos queda como

$$\begin{aligned} X_r(t) &= B \left[ \cos 2\pi f t - \frac{4\pi}{\lambda} (r_0 - vt \cos(\alpha)) \right] \\ &= B \cos \left[ \left( 2\pi f + \frac{4\pi v \cos(\alpha)}{\lambda} \right) t - \varphi_0 \right] \end{aligned} \quad (10)$$

donde  $\varphi_0 = \frac{4\pi r_0}{\lambda}$  es un retraso de fase insignificante. Lo más relevante de esto es la variación de frecuencia que surge en la señal reflejada respecto a la generada.

$$f_R = f + \frac{2v \cos(\alpha)}{\lambda} \quad (11)$$

de manera que la frecuencia Doppler se describe como

$$f_d = f_R - f = \frac{2v \cos(\alpha)}{\lambda} \quad (12)$$

### 1.1.3 Sensor HB100

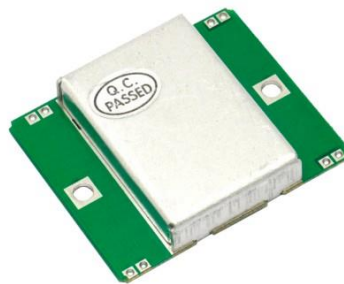


Figura 2. Módulo HB100

### 1.1.3.1 Introducción y descripción del sensor

El sensor de microondas HB100 es un módulo transceptor Doppler bi-estático, que trabaja en la banda X del espectro de frecuencias. Es un módulo que está diseñado para detección de movimiento.

El sensor consiste en un oscilador resonador dieléctrico, un mezclador de microondas y un par de antenas tipo parche, una para transmisión y la otra recepción. [6]

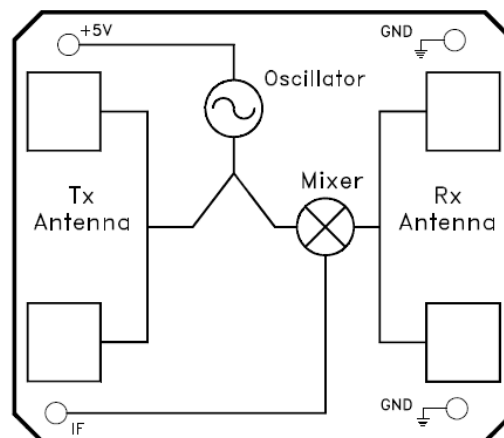


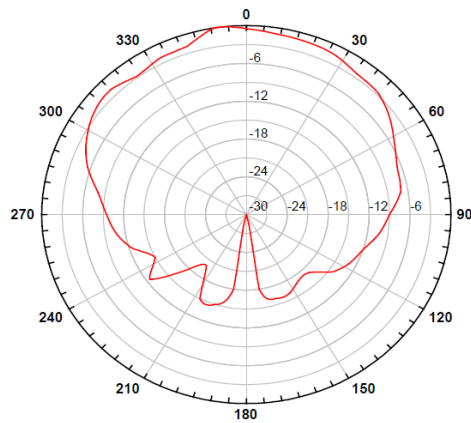
Figura 3. Diagrama de bloques HB100

### 1.1.3.2 Características del sensor HB100

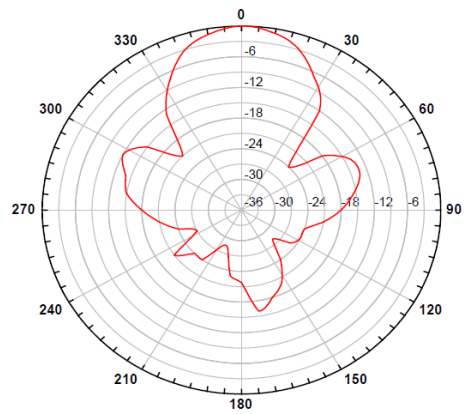
Se trata de un módulo LPDR (dispositivo de baja potencia de radiación) que está alimentado a 5V por lo que es adecuado para ser utilizado con dispositivos como Arduino que poseen un pin para proveer de alimentación a 5V.

La frecuencia de transmisión de este módulo se encuentra en torno a los 10.525GHz por lo que se trata de un sensor que opera en la banda X (8GHz-12 GHz). La precisión del oscilador no es de gran importancia por el diseño que tiene. Ya que se introduce la señal en el mezclador por lo que nos quedamos únicamente con la diferencia de frecuencia entre la señal emitida y la retornada.

Las antenas tipo parche han de colocarse de cara a la zona de detección deseada. En la figura 4 se pueden observar los patrones de radiación de las antenas del sensor.



**Azimuth**



**Elevation**

*Figura 4. Diagramas de radiación del sensor HB100*

Como se puede ver en la Figura 3, el módulo contiene cuatro terminales. Uno para la alimentación a 5V, otro para la señal de salida del sensor y otros dos para la tierra del sistema.

El pin IF da la señal de salida del sensor que va a situarse en el rango de los microvoltios por lo que es necesario un circuito de acondicionamiento que nos dé una señal amplificada para que pueda ser procesada adecuadamente. Esta señal es proporcional a la reflexión de la energía transmitida. [6]

Parameter	Notes	Min	Typ.	Max	Units
Frequency Setting	1	10.520	10.525	10.530	GHz
Radiated Power (EIRP)	1	12	15	20	dBm
Spurious Emission	1			-7.3	dBm
Settling Time			3	6	$\mu$ Sec
Received Signal Strength	2		200		$\mu$ Vp-p
Noise	3			5	$\mu$ Vrms
Antenna Beam-width (3 dB) - Azimuth			80		°
Antenna Beam-width (3 dB) - Elevation			40		°
Supply Voltage		4.75	5.00	5.25	VDC
Current Consumption			30	40	mA
Pulse Repetition Frequency	4		2		KHz
Pulse Width	4	10			$\mu$ Sec
Operating Temperature		-15		55	°C
Weight			8		gm

*Figura 5. Hoja de características del sensor HB100*

### 1.1.3.3 Funcionamiento del módulo HB100

Como se puede apreciar en el diagrama de bloques de la figura 3, se trata de un sistema sencillo. En primer lugar, se alimenta con un voltaje constante de +5V el oscilador, y este genera una señal con una frecuencia de 10.525 GHz. Posteriormente la señal se divide y por un lado va hacia la antena transmisora y por otro lado entra en el mezclador para terminar generando una señal a la salida del mezclador que ira al terminal IF del sensor.

De esta forma, si partimos de las ecuaciones (6) y (10) nos queda que la señal a la salida quedará tal que

$$\begin{aligned} X_{if} &= A \cos(2\pi f t) * B \cos\left[\left(2\pi f + \frac{4\pi v \cos(\alpha)}{\lambda}\right) t - \varphi_0\right] \\ &= \frac{A * B}{2} \left( \cos\left(2\pi \frac{2v \cos(\alpha)}{\lambda} t\right) + \cos\left(2\pi 2f t + \frac{4\pi v \cos(\alpha)}{\lambda} - \varphi_0\right) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Por tanto, quedará a la salida una señal con dos componentes frecuenciales, una de ellas estará en torno a 2 veces la frecuencia de transmisión (entorno a 21GHz) y la otra será la frecuencia Doppler. La componente a 21 GHz nos será irrelevante ya que será filtrada por el sistema de acondicionamiento además de que al tratarse de una señal de muy alta frecuencia tampoco podría ser siquiera procesada por el Arduino. De esta manera nos quedaremos con una expresión con una única componente

$$X_{if} = \frac{A * B}{2} \cos\left(2\pi \frac{2v \cos(\alpha)}{\lambda} t\right) \quad (14)$$

De la cual se deduce la frecuencia de la señal que viene dada por

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{2v \cos(\alpha)}{\lambda} \\ &= \frac{2f_t v \cos(\alpha)}{c} \end{aligned} \quad (15)$$

Donde  $f$  es la frecuencia de transmisión, en este caso  $f = 10.525 \text{ GHz}$  y  $c$  es la velocidad de la luz  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Sustituyendo estos datos nos queda

$$f_d = \frac{2 * v * 10.525 * 10^9 * \cos(\alpha)}{3 * 10^8} \quad (16)$$

De esta manera se puede obtener fácilmente la velocidad a la que se está moviendo el objeto respecto al sensor.

$$v = \frac{f_d}{19.49 \cdot \cos(\alpha)} \text{ Km/h} \quad (17)$$

#### 1.1.4 Arduino



*Figura 6. Logo Arduino*

##### 1.1.4.1 Introducción

Arduino es una plataforma de electrónica open-source pensada para dar la mayor facilidad posible tanto en hardware como en software. Arduino nació principalmente como una herramienta que permitía ser utilizada de manera rápida para prototipos pensada para estudiantes sin una base muy profunda en electrónica y programación. [7]

Poco a poco se fue extendiendo cada vez más con una comunidad muy grande detrás y pronto fueron apareciendo distintas placas que se adaptaban a las necesidades de las distintas personas. Todas estas placas son totalmente abiertas y cualquiera tiene acceso a los esquemáticos de sus placas a través de la web.

En la siguiente tabla comparativa se pueden ver las diferencias entre los distintos modelos que ofrecen.

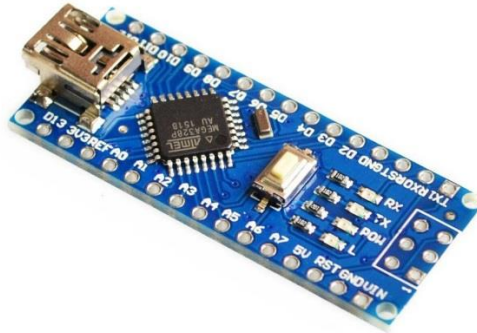


Name	Processor	Operating/Input Voltage	CPU Speed	Analog In/Out	Digital IO/PWM	EEPROM [kB]	SRAM [kB]	Flash [kB]	USB	UART
101	Intel® Curie	3.3 V/ 7-12V	32MHz	6/0	14/4	-	24	196	Regular	-
Gemma	ATTiny85	3.3 V / 4-16 V	8 MHz	1/0	3/2	0.5	0.5	8	Micro	0
LilyPad	ATmega168V ATmega328P	2.7-5.5 V / 2.7-5.5 V	8MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	-
LilyPad SimpleSnap	ATmega328P	2.7-5.5 V / 2.7-5.5 V	8 MHz	4/0	9/4	1	2	32	-	-
LilyPad USB	ATmega32U4	3.3 V / 3.8-5 V	8 MHz	4/0	9/4	1	2.5	32	Micro	-
Mega 2560	ATmega2560	5 V / 7-12 V	16 MHz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
Micro	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
MKR1000	SAMD21 Cortex-M0+	3.3 V/ 5V	48MHz	7/1	8/4	-	32	256	Micro	1
Pro	ATmega168 ATmega328P	3.3 V / 3.35-12 V 5 V / 5-12 V	8 MHz 16 MHz	6/0	14/6	0.512 1	1 2	16 32	-	1
Pro Mini	ATmega328P	3.3 V / 3.35-12 V 5 V / 5-12 V	8 MHz 16 MHz	6/0	14/6	1	2	32	-	1
Uno	ATmega328P	5 V / 7-12 V	16 MHz	6/0	14/6	1	2	32	Regular	1
Zero	ATSAMD21C18	3.3 V / 7-12 V	48 MHz	6/1	14/10	-	32	256	2 Micro	2
Due	ATSAM3X8E	3.3 V / 7-12 V	84 MHz	12/2	54/12	-	96	512	2 Micro	4
Esplora	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	-	-	1	2.5	32	Micro	-
Ethernet	ATmega328P	5 V / 7-12 V	16 MHz	6/0	14/4	1	2	32	Regular	-
Leonardo	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
Mega ADK	ATmega2560	5 V / 7-12 V	16 MHz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
Mini	ATmega328P	5 V / 7-9 V	16 MHz	8/0	14/6	1	2	32	-	-
Nano	ATmega168 ATmega328P	5 V / 7-9 V	16 MHz	8/0	14/6	0.512 1	1 2	16 32	Mini	1
Yún	ATmega32U4 AR9331 Linux	5 V	16 MHz 400MHz	12/0	20/7	1	2.5 16MB	32 64MB	Micro	1
Arduino Robot	ATmega32u4	5 V	16 MHz	6/0	20/6	1 KB (ATmega32u4)/ 512 Kbit (12C)	2.5 KB (ATmega32u4)	32 KB (ATmega32u4) of which 4 KB used by bootloader	1	1
MKRZero	SAMD21 Cortex-M0+ 32bit low power ARM MCU	3.3 V	48 MHz	7 (ADC 8/10/12 bit)/1 (DAC 10 bit)	22/12	No	32 KB	256 KB	1	1

*Figura 7. Tabla comparativa de placas Arduino*

#### 1.1.4.2 Arduino Nano

Para este proyecto, se va a utilizar un Arduino nano, ya que dispone del mismo procesador que el Arduino Uno pero con un menor tamaño y un menor consumo.



*Figura 8. Arduino nano*

Dispone de un procesador ATmega328, al igual que muchas de las placas de Arduino. Además, dispone de posibilidad de alimentarlo vía USB mini-b, el pin 30 con un voltaje no regulado de 6-20V, o utilizando el 27 con una fuente regulada a 5V. [8]

Observando la hoja de características del Arduino nano, tiene unas dimensiones de 18x45mm, lo cual es un tamaño bastante bueno para poder incrustarlo en nuestra PCB.

Microcontroller	ATmega328
Architecture	AVR
Operating Voltage	5 V
Flash Memory	32 KB of which 2 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
Clock Speed	16 MHz
Analog IN Pins	8
EEPROM	1 KB
DC Current per I/O Pins	40 mA (I/O Pins)
Input Voltage	7-12 V
Digital I/O Pins	22 (6 of which are PWM)
PWM Output	6
Power Consumption	19 mA
PCB Size	18 x 45 mm
Weight	7 g
Product Code	A000005

*Figura 9. Hoja de características Arduino nano*

#### 1.1.4.3 Arduino IDE

El software de código abierto de Arduino proporciona una forma fácil y rápida de escribir código y subirlo a las placas. Es compatible con cualquier sistema Windows, Mac o Linux y funciona con cualquier placa Arduino del mercado.

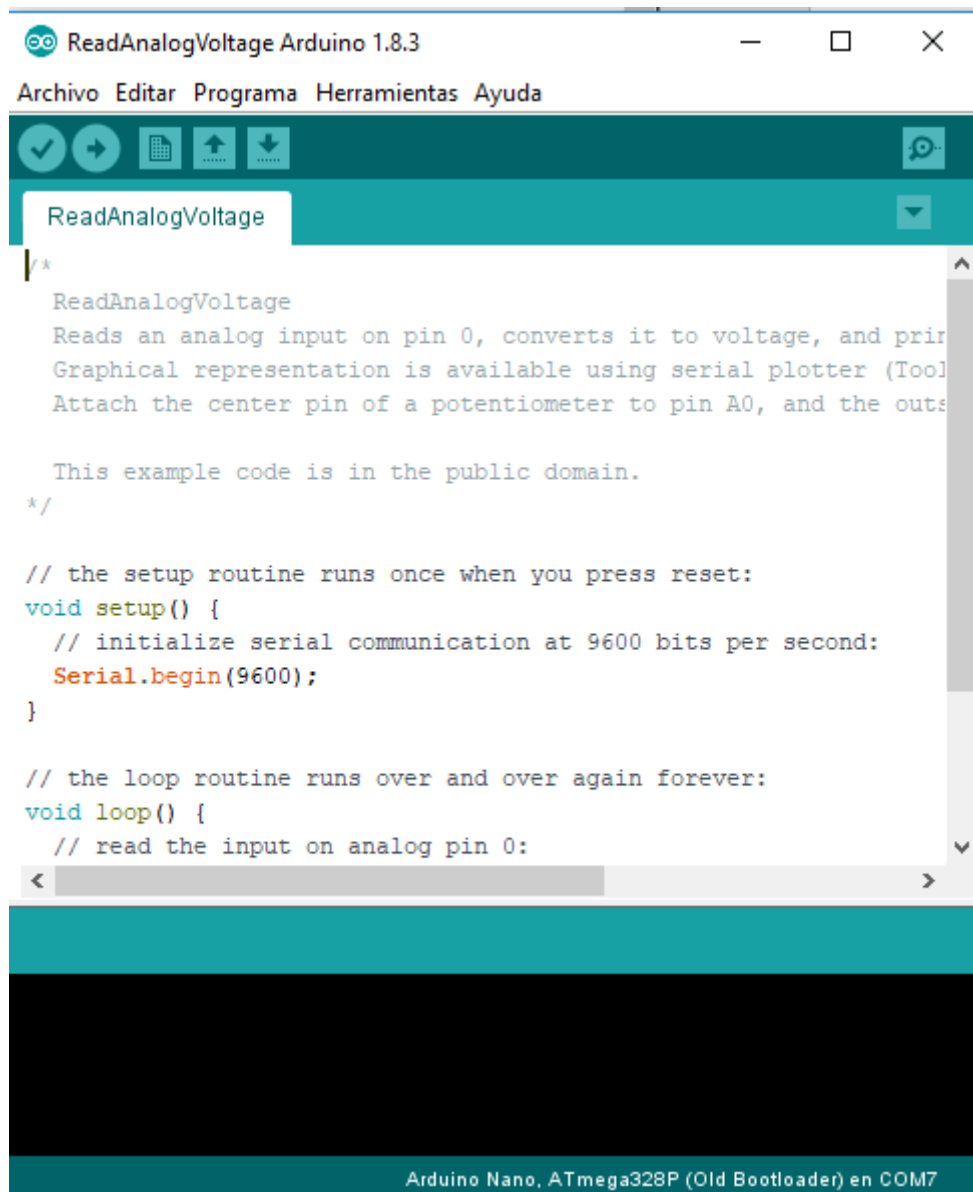


Figura 10. Arduino IDE

El Arduino IDE está escrito en java y cuenta con un gestor de actualizaciones y librerías que permite mantenerlo actualizado. Además, incluye un montón de programas de ejemplo para facilitar comprobaciones e iniciarse en el uso de Arduino.

Para ver desde el ordenador los resultados que se van generando y poder corregir posibles fallos incluye un monitor serie el cual nos muestra por pantalla lo que se le ordene que escriba y un serial plotter que sirve para interpretar los datos obtenidos por el puerto serie sobre una gráfica.

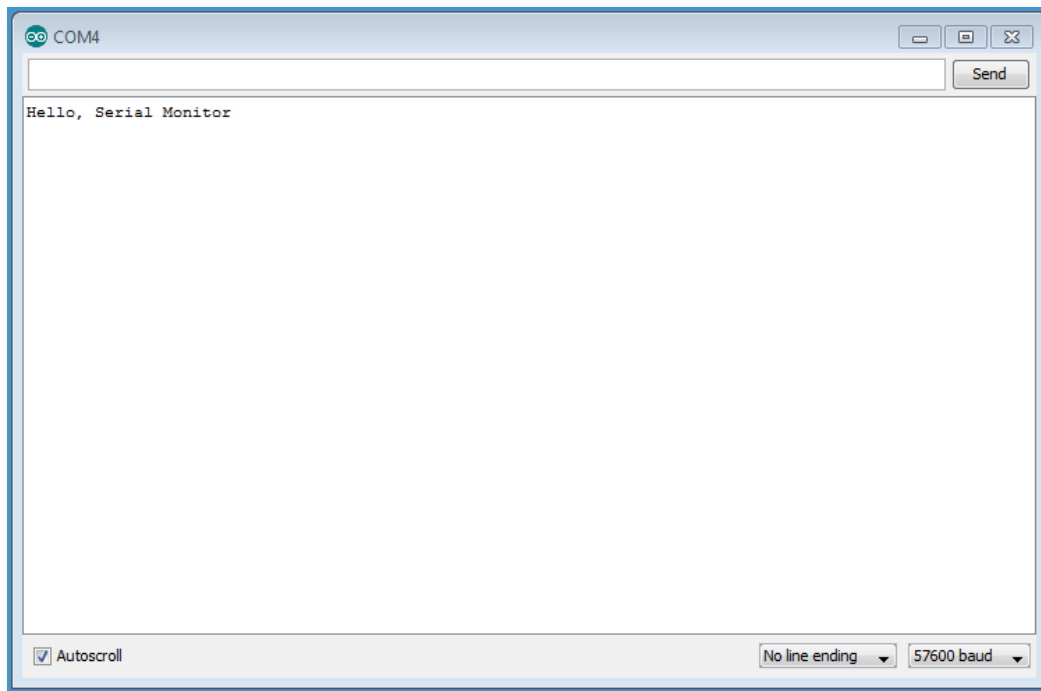


Figura 11. Monitor serie Arduino IDE

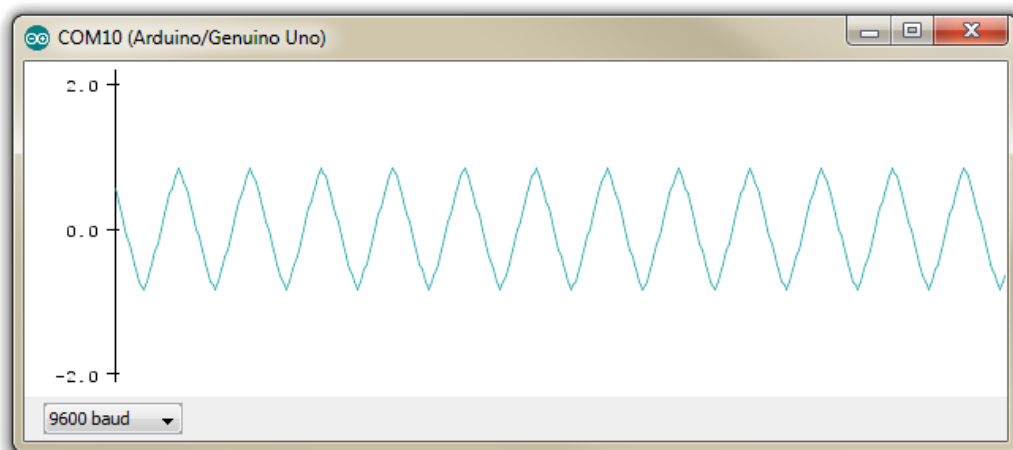


Figura 12. Serial Plotter Arduino IDE

## 2. Objetivos

El objetivo general de este proyecto fin de grado es lograr un sistema que nos permita detectar y contabilizar el paso de personas en entornos rurales utilizando tecnologías inalámbricas, más concretamente utilizando un sensor basado en el efecto Doppler que opera a 10Ghz y tecnología libre como Arduino.

Para lograr cumplimiento de este objetivo general, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar y seleccionar entre los distintos sensores RF disponibles en el mercado.
- Diseñar un circuito de amplificación y filtrado optimizándolo para la banda frecuencial deseada.
- Desarrollar un algoritmo que permita detectar y contabilizar el paso de personas utilizando la información que obtenida de la señal procesada.
- Analizar las limitaciones del sensor HB100 a la hora de contabilizar el paso de personas de forma simultánea.

### 3. Metodología

Para el desarrollo del proyecto, se utilizaron los siguientes métodos científicos:

- Teóricos:
  - Histórico-Lógico: Para el estudio teórico de los antecedentes en los sistemas de radar, detección de personas y su uso en entornos rurales.
  - Inductivo-Deductivo: Para la correcta identificación de los elementos más relevantes en el diseño del sistema.
- Empíricos:
  - Análisis Documental: Para analizar las características de los distintos componentes utilizados a lo largo del proyecto.
  - Simulación: Para comprobar que los diseños se comportaban de la manera esperada.
  - Experimental: Para comprobar el comportamiento del sistema en un entorno real.

## 4. Desarrollo del TFG

En el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado se pueden apreciar varias partes fundamentales:

- Documentación: Periodo de búsqueda de información sobre el sensor HB100 y su funcionamiento.
- Diseño del circuito de acondicionamiento: Etapa de diseño del circuito de acondicionamiento del sensor para que se adapte a las necesidades del proyecto
- Montaje del circuito de acondicionamiento y análisis de su comportamiento en el laboratorio de electrónica.
- Diseño de la PCB, una vez comprobado el correcto funcionamiento del sistema.
- Caracterización del sistema para poder efectuar las correcciones necesarias vía software.
- Diseño del algoritmo: Realización del algoritmo que nos permita contabilizar el paso de personas.

### 4.1 Documentación

Durante este periodo el objetivo era: Informarse sobre las características del sensor HB100. Para ello se utilizaron por un lado la “*nota de aplicación del fabricante*” [6] y la “*hoja de características del sensor HB100*” [9]. Además, se aprovechó este periodo para profundizar en los fundamentos del efecto Doppler y realizar un pequeño análisis previo sobre las posibles configuraciones que podría disponer el sistema.

Tras analizar los documentos, se pudo apreciar que la salida que ofrece el sensor es del rango de microvoltios, por lo que se entiende la necesidad de acondicionar la salida para poder ser capaces de procesar la información mediante Arduino. Además, el fabricante indica que el paso de dos personas puede hacer variar la amplitud de la señal en un 50% respecto al paso de una única persona. Esto dará la posibilidad de detectar el paso de más de una persona.

## 4.2 Diseño del circuito de acondicionamiento

El problema de estar trabajando con un sensor que opera en pequeña señal en el orden de microvoltios es que es imposible procesarlo con Arduino. Por ello es necesario realizar el diseño de acondicionamiento del sistema de manera que nos permita amplificar la señal evitando al máximo posible el ruido.

El fabricante propone un circuito de acondicionamiento para el sistema que se puede observar en la siguiente figura.

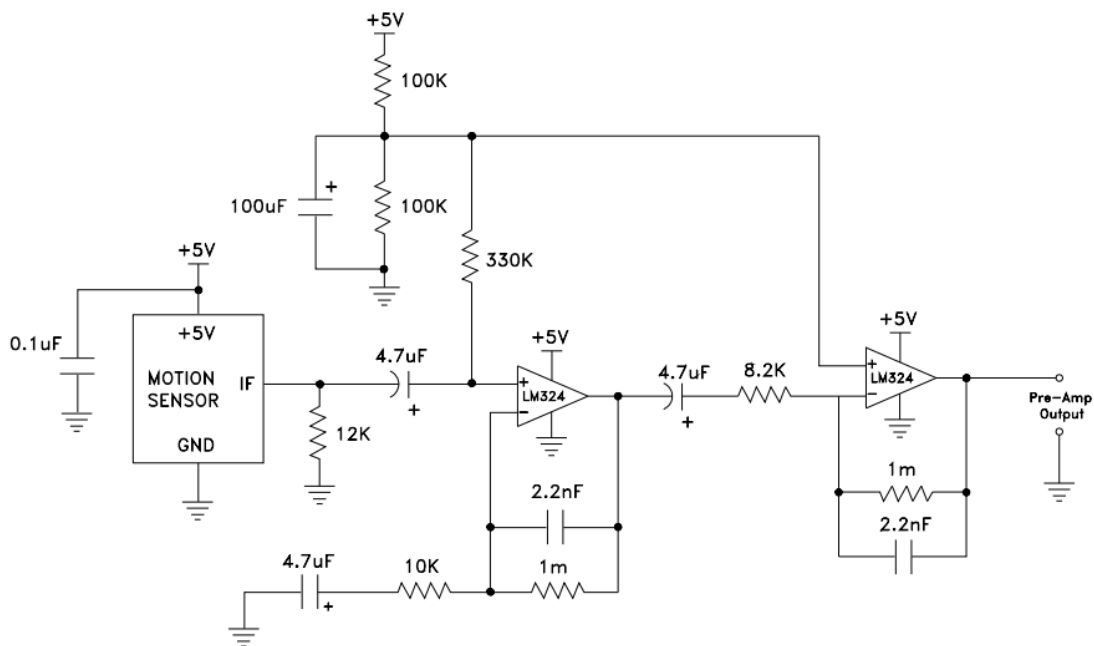


Figura 13. Circuito de acondicionamiento propuesto por el fabricante

Si se analiza el circuito de la figura 2 parte por parte, se puede apreciar que se compone de distintas etapas. Por un lado, a la salida del sensor tenemos un filtro Paso alto compuesto por la resistencia de  $12k\Omega$  y el condensador de  $4.7\mu F$  con una frecuencia de corte en 2.82 Hz para eliminar la componente en DC a la entrada del sistema.

$$f_c = \frac{1}{2\pi * 12k * 4.7\mu F} = 2.82 \text{ Hz} \quad (18)$$

Después se encuentran dos filtros paso banda activos, que son los que se encargan de la ganancia del sistema en las frecuencias deseadas. Al igual que en el caso anterior las resistencias y los condensadores marcan las frecuencias de corte del sistema.

En primer lugar hay un filtro activo paso banda inversor como el que se puede apreciar en la siguiente figura.



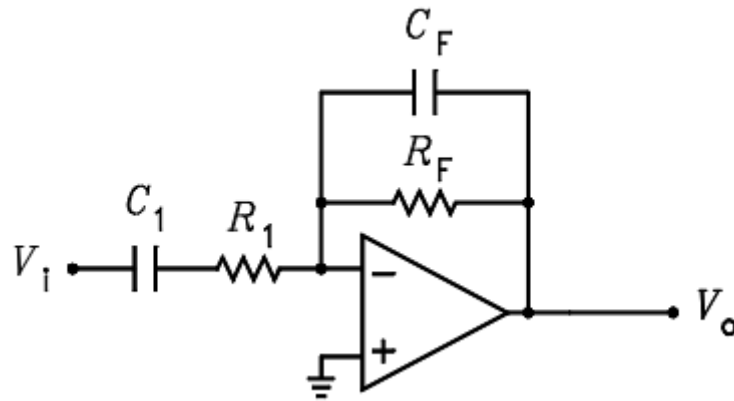


Figura 14. Filtro paso banda inversor

La frecuencia de corte baja de este circuito la marca la resistencia de 10k en serie con el condensador de 4.7uF. La frecuencia de corte alta en cambio viene marcada por el condensador de 2.2nF que se encuentra en paralelo con la resistencia de 1MΩ.

$$f_L = \frac{1}{2\pi * 10k * 4.7\mu F} = 3.38 \text{ Hz} \quad (19)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi * 1M\Omega * 2.2nF} = 72.34 \text{ Hz} \quad (20)$$

La segunda etapa se trata de un filtro paso banda no inversor en el que las frecuencias de corte quedan de la siguiente manera.

$$f_L = \frac{1}{2\pi * 8.2k * 4.7\mu F} = 4.13 \text{ Hz} \quad (21)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi * 1M\Omega * 2.2nF} = 72.34 \text{ Hz} \quad (22)$$

La ganancia del sistema la podemos calcular mediante las relaciones de las resistencias.

$$G_1 = \frac{1M\Omega}{10k} = 100 \quad (23)$$

$$G_2 = \frac{1M\Omega}{8.2k} = 121.95 \quad (24)$$

$$G_T = 100 * 121.95 = 12195 \quad (25)$$

Si se analiza este circuito con algún tipo de simulador de circuitos electrónicos, como en este caso Orcad capture y pspice, se puede apreciar el siguiente comportamiento del



sistema.

*Figura 15. Respuesta en frecuencia del circuito de acondicionamiento propuesto por el fabricante*

Se aprecia que el sistema está pensado para tener la máxima ganancia entorno a 20hz, y después va decayendo con una pequeña curva hasta cerca de 1khz donde la ganancia es prácticamente nula.

Para poder realizar mediciones de la energía que vuelve reflejada al sensor y tratar de aproximar el número de personas que están pasando simultáneamente es necesario que el sistema tenga una ganancia lineal entorno a las frecuencias que genera al caminar el ser humano. En la ecuación (17) se observa la relación de la velocidad con la frecuencia apreciada para este sensor concreto que opera a 10.525 GHz.

Suponiendo que la velocidad promedio de caminar de un ser humano se encuentra entorno a los 4-6 Km/h y que sustituyendo en la ecuación (17) para un humano que se encuentra en movimiento en la dirección del eje del sensor nos queda que

$$f_d = 4 * 19.49 * \cos(0) = 77.96 \text{ Hz} \quad (26)$$

$$f_d = 6 * 19.49 * \cos(0) = 116.94 \text{ Hz} \quad (27)$$

La frecuencia para el andar del ser humano se encontrada entre 77.96 y 116.94 Hz. Lo ideal es realizar una ganancia del sistema que sea lo más lineal posible en torno a ese rango para que de esta manera se pueda ajustar la amplitud recibida para poder identificar patrones que respondan al paso de diferente número de personas.

#### 4.2.1 Circuito acondicionamiento adaptado

Para lograr los objetivos deseados, se trata de mover la banda de paso de manera que nos quede el rango mencionado en el apartado anterior en la zona más lineal del sistema.

Para ello se modifican los valores de las frecuencias de corte de las etapas del sistema, tratando de mantener la relación entre las resistencias para no perder ganancia. El circuito de acondicionamiento final se puede apreciar en la siguiente figura.

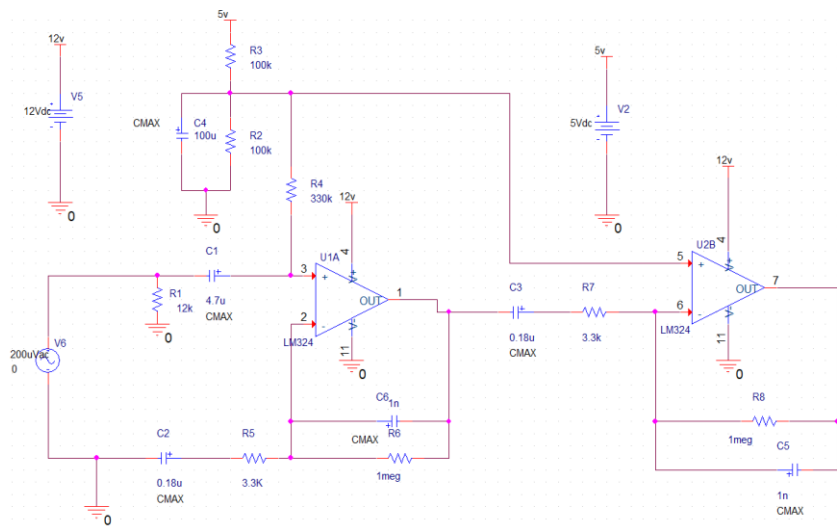


Figura 16. Circuito Acondicionamiento adaptado

Las frecuencias de corte para ambas etapas quedan de la siguiente manera, ya que se han utilizado los mismos componentes en las dos.

$$f_H = \frac{1}{2\pi * 3.3k * 0.18\mu F} = 267.94 \text{ Hz} \quad (28)$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi * 10k * 4.7\mu F} = 159.15 \text{ Hz} \quad (29)$$

La respuesta del sistema nos deja una zona de ganancia lineal entorno a las frecuencias correspondientes al caminar como se puede apreciar en la siguiente figura.

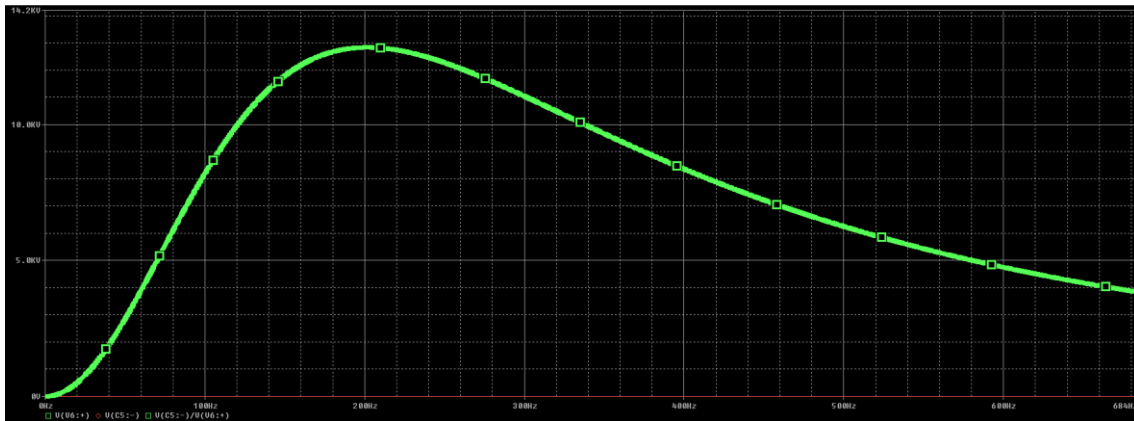


Figura 17. Respuesta en Frecuencia del circuito de acondicionamiento modificado

#### 4.2.2 Medida de la velocidad

Para obtener la velocidad a la que se está moviendo el objeto, se debe usar la ecuación (17) y para ello es necesario conocer la frecuencia de la señal que tenemos a la salida del sistema. Para el uso de Arduino, una opción es realizar un comparador utilizando un amplificador operacional. Se toma la señal de salida del sistema respecto a una señal de referencia que tenga el mismo valor que la señal del sistema cuando no hay nada moviéndose. Se puede apreciar el circuito en la Figura 18

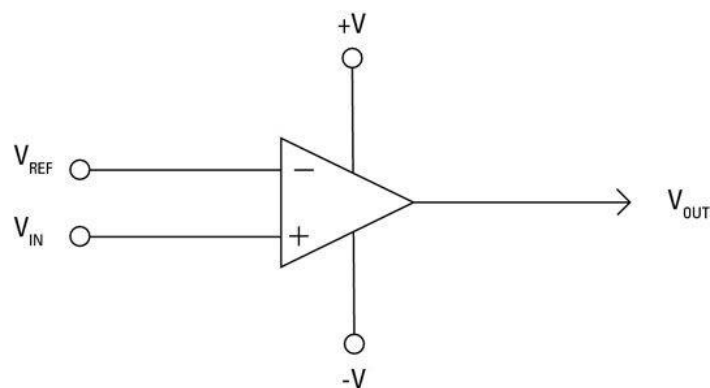
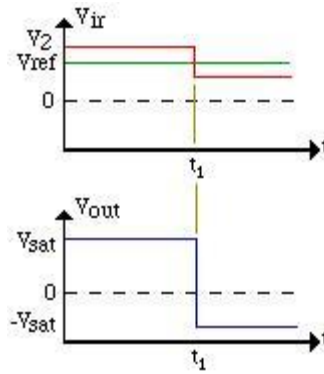


Figura 18. Comparador con amplificadores operacionales



*Figura 19. Comportamiento de la salida respecto a la entrada del comparador*

De esta manera cuando el sensor detecte movimiento, generará una señal de salida con una amplitud mayor a la del voltaje de referencia con lo que la salida de este amplificador comenzará a oscilar y se obtendrá una salida digital adecuada para medir con un pin digital de Arduino.

Como se van a utilizar un total de 3 Amplificadores para el circuito de acondicionamiento se ha optado por utilizar los circuitos integrados LM324N pertenecientes a Texas Instruments.



*Figura 20. Circuito Integrado LM324N*

Este circuito integrado se compone de 4 Amplificadores independientes que funcionan en el rango de 3V-32V lo que permite tener una variedad de opciones para su uso.

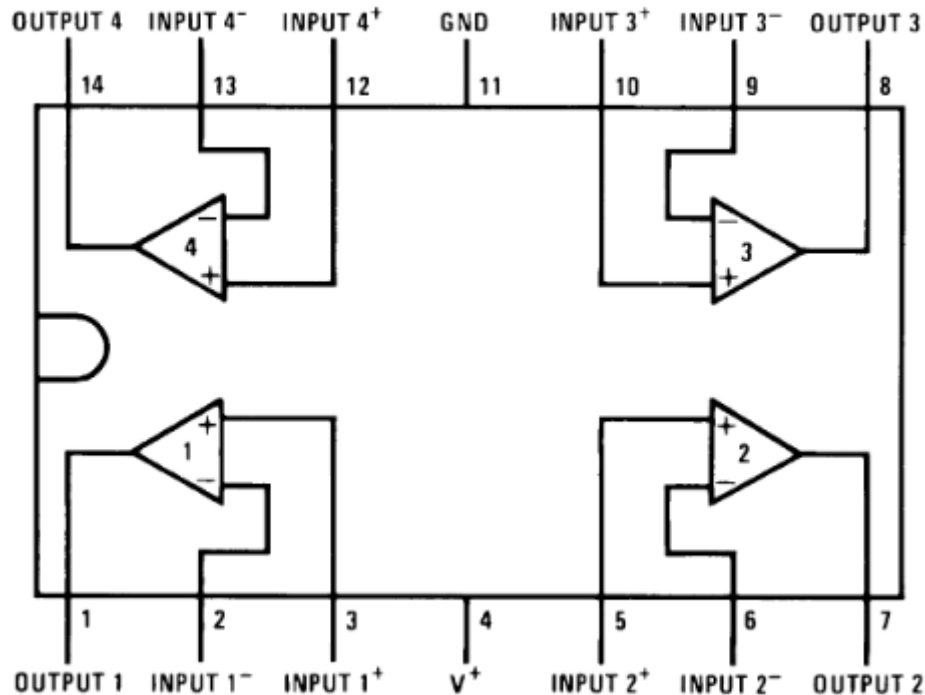


Figura 21. Diagrama de bloques del LM324N

#### 4.2.3 Medida de la amplitud

Una vez obtenida la frecuencia para medir la velocidad a la que se están moviendo las personas, nos interesa medir la amplitud de la señal recibida, ya que a partir de esta se pretende ser capaces de distinguir el número de personas que están pasando por el camino.

Por un lado, es necesario tener en cuenta que para las frecuencias correspondientes a la velocidad del caminar tenemos una ganancia lineal, por lo que deberemos tener en cuenta este factor para normalizar la amplitud para todas las frecuencias y de esta manera hacer que la amplitud a la salida del sistema dependa únicamente de la potencia que llega reflejada.

Por otra parte, hace falta tener en cuenta que, al poner un sensor a un lado del camino, observando la potencia reflejada, puede ser que no podamos diferenciar si la amplitud que se está obteniendo es debido a una persona que pasa muy cerca del sensor o a dos personas que pasan más alejadas de este. Para evitar este problema, se pretende utilizar dos sensores uno a cada lado del camino de manera que, realizando un promedio de la salida de cada uno de los dos sensores, conseguiremos un valor que va a depender únicamente de la cantidad de gente que pase por el camino. El uso de otro sensor

ayudara también a la exactitud respecto a la medición de la velocidad, ya que tendremos dos puntos de medición.

Para medir la amplitud se agregará un circuito rectificador junto a un filtro a la señal de salida del sistema para poder medir la amplitud de cada uno de los sensores para poder ser introducidos en los pines analógicos del Arduino.

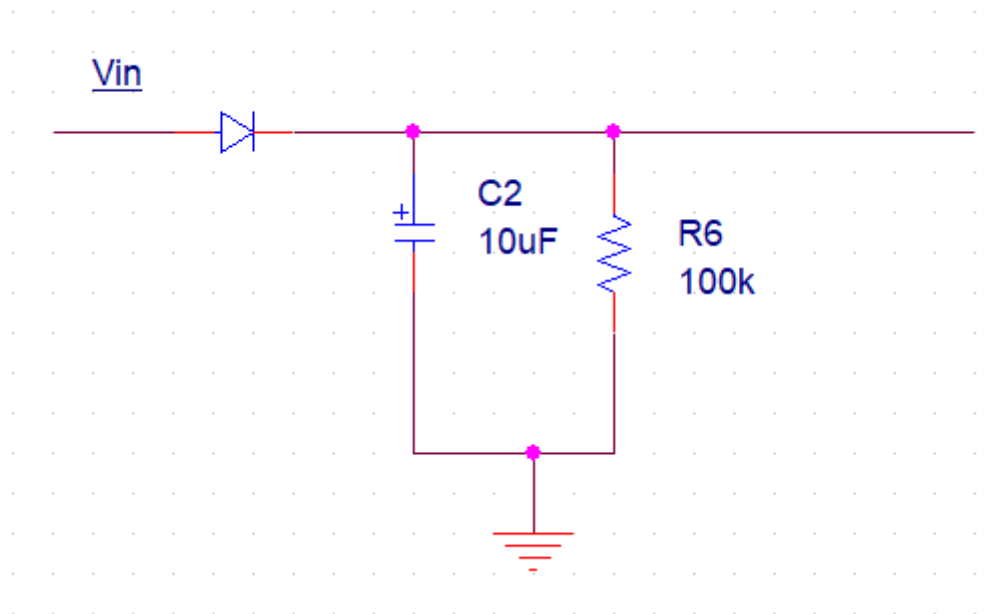


Figura 22. Circuito rectificador con filtro

#### 4.2.4 Adaptación para la lectura de las señales con Arduino

Antes de introducir las señales en los pines del Arduino, debemos tener en cuenta que Arduino acepta únicamente voltajes en el rango de 0-5V, por lo que hay que rebajar tanto la señal de la frecuencia como la de la amplitud, ya que estamos utilizando un operacional que está operando a 0-12V. Para ello se utilizará un divisor de tensión como el de la tal que nos queden ambas señales en el rango deseado.

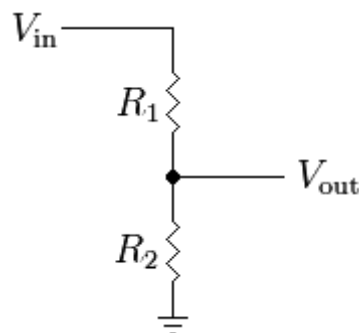


Figura 23. Divisor de tensión

Siendo la salida  $V_{out}$

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (30)$$

Una vez adecuadas las salidas del sistema, ya estarán listas para ser introducidas directamente en los pines del Arduino.

#### 4.3 Montaje del circuito y análisis de su comportamiento en el laboratorio

Tras haber terminado con el diseño del sistema, se procede a realizar el montaje para comprobar su correcto funcionamiento.

Para el montaje del sistema, debido a la multitud de elementos que los componen, lo ideal es ir montándolo por etapas y comprobar que todas las partes del mismo funcionan correctamente. Se pueden utilizar protoboards para el montaje experimental ya que nos proporcionan rapidez y facilidad a la hora de cambiar elementos y realizar las conexiones.

Para la alimentación se van a utilizar inicialmente fuentes de alimentación del laboratorio para posteriormente cuando se haya comprobado que todo el sistema funciona correctamente introducir la alimentación vía Arduino.

En primer lugar, se realiza la comprobación de la parte del circuito que genera el nivel sobre el que oscilara la señal proveniente del sensor.

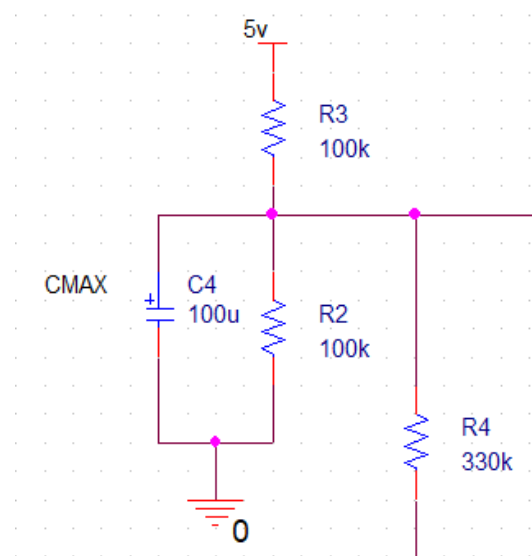


Figura 24. Parte del circuito que establece el nivel sobre el que oscila el sensor



Una vez comprobado que se encuentra bien conectado, pasamos a conectar la primera de las etapas del sistema.

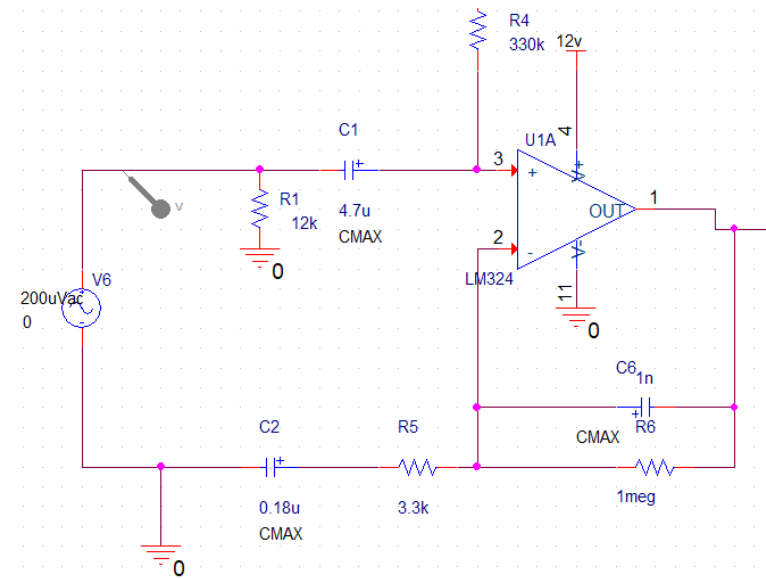


Figura 25. Primera etapa del circuito de acondicionamiento

En la Figura 25 se puede observar cómo se ha utilizado un generador de señales del laboratorio para simular el comportamiento del sensor HB100. Una vez realizado el montaje, se comprueba la conectividad entre todos los nodos y una vez visto que es correcto se enlaza con la parte anterior del circuito y se comprueba con el osciloscopio del laboratorio la señal de salida obtenida.

Tras haber realizado la comprobación se monta la segunda etapa del sistema quedando como resultado el esquema de la Figura 16.

Para comprobar que el sistema se comporta de la manera que nos indicaba la simulación, se utiliza el generador de señales del laboratorio como entrada en el sistema. El problema del generador de señales del laboratorio es que la amplitud más pequeña que nos permite el sistema ronda los milivoltios, por lo que se opta por reducir entre 10 la ganancia de cada uno de los amplificadores para corroborar la respuesta del sistema.

Como se aprecia en el apartado 2.2 la ganancia del sistema depende de las resistencias en las etapas. De esta manera modificando las resistencias, pero manteniendo la relación de las frecuencias de corte podemos ver cuál es la respuesta del sistema, pero con una amplitud que podamos procesar.

Frecuencia(Hz)	Voltaje entrada(V)	Voltaje simulado(V)	Voltaje real(V)	Ganancia
50	0,02	0,621	0,656	32,8
60	0,02	0,844	0,88	44
70	0,02	1.08	1,12	56
80	0,02	1.31	1,36	68
90	0,02	1.54	1,6	80
100	0,02	1.76	1,82	91
110	0,02	1.96	2,04	102

120	0,02	2.13	2,2	110
-----	------	------	-----	-----

Tabla 1. Ganancia del sistema para distintas frecuencias

En la Tabla 1, se puede observar el comportamiento del sistema para las distintas frecuencias y como la ganancia es aproximadamente lineal tal y como indicaba la simulación.

Una vez comprobado esto, hay que añadir el rectificador de señal y el comparador para introducir las señales en el Arduino.

Por último, es necesario comprobar el correcto funcionamiento del sistema utilizando un convertidor DC/DC TMA-0512D que será necesario para alimentar el amplificador operacional a 12V.

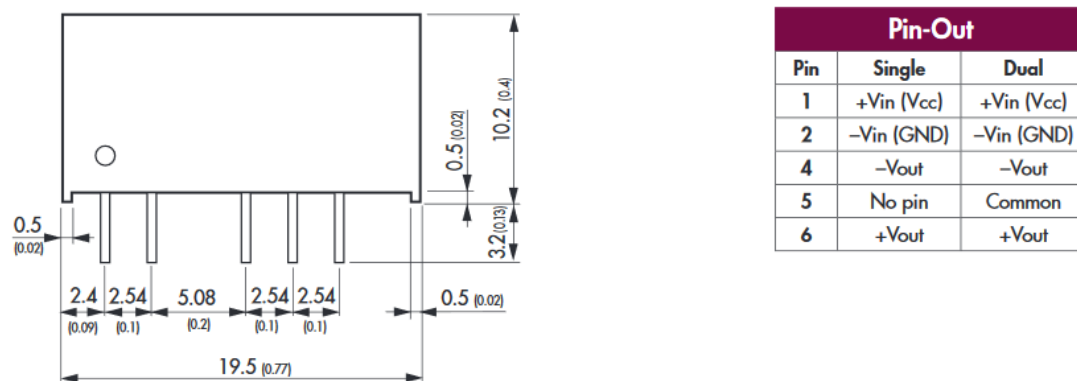
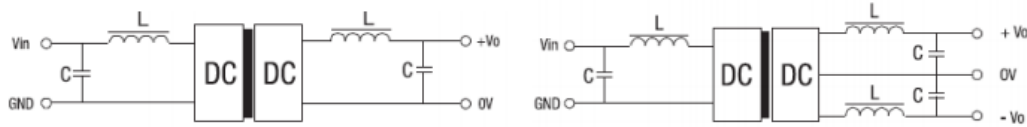


Figura 26. Convertidor 5V-12V traco power TMA-0512D

El uso del convertidor genera ruido en el sistema, por lo que hace falta añadir unos condensadores de desacoplo a la entrada y salida del componente. Para un voltaje de entrada de 5V y uno de salida de 12V se recomienda el uso de condensadores de  $4.7\mu F$  a la entrada y de  $1\mu F$  a la salida del convertidor [10].



External Capacitor Table for Single Output			
Vin	External Capacitor	Vout	External Capacitor
5VDC	4.7 $\mu$ F	5VDC	10 $\mu$ F
12VDC	2.2 $\mu$ F	9VDC	4.7 $\mu$ F
24VDC	1 $\mu$ F	12VDC	2.2 $\mu$ F
--	--	15VDC	1 $\mu$ F

External Capacitor Table for Dual Output			
Vin	External Capacitor	Vout	External Capacitor
5VDC	4.7 $\mu$ F	5VDC	4.7 $\mu$ F
12VDC	2.2 $\mu$ F	9VDC	2.2 $\mu$ F
24VDC	1 $\mu$ F	12VDC	1 $\mu$ F
--	--	15VDC	0.47 $\mu$ F

Figura 27. Recomendaciones de valores de condensadores para compensar el ruido generado por el convertidor

#### 4.3.1 Resultados obtenidos del montaje experimental

Tras haber realizar el montaje completo del sistema, hace falta comprobar que los datos que obtenemos con el Arduino son buenos. Para ello se utilizará una primera versión del programa con el que se comprobarán por un lado la exactitud para determinar la velocidad y por otro la linealidad respecto la ganancia del sistema.

Para leer la frecuencia en Arduino se realizará como se explica en el apartado Medida de la velocidad, para ello se ha creado un sketch utilizando el Arduino Ide que se puede ver en el apartado Diseño del software.

Utilizando como señal de entrada el generador de señales del laboratorio se realizado pruebas del valor resultante obtenido de la frecuencia tras ejecutar el programa. Para realizar las mediciones se han utilizado el rango de frecuencias entorno el que se encontrara el andar de una persona.

Frecuencia real	Frecuencia leída	Error absoluto	Error relativo
60	60,41	0,41	0,006833333
70	70,46	0,46	0,006571429
80	80,52	0,52	0,0065
90	90,59	0,59	0,006555556
100	100,6	0,6	0,006
110	110,71	0,71	0,006454545
120	120,79	0,79	0,006583333
	PROMEDIO	0,582857143	0,006499742

Tabla 2 Resultados de medición de la frecuencia.

En la Tabla 2 se puede apreciar que el error obtenido en las lecturas con el Arduino está en torno al 0.65%. Además, se observa cómo se mantiene más o menos constante este error en todas las frecuencias, por lo que de ser necesaria una mayor precisión se podría

corregir vía software. Para comprobar el comportamiento de la amplitud y la ganancia con respecto a la entrada se puede utilizar también el generador de funciones. De esta manera se pretende ver la respuesta del sistema para distintas amplitudes y frecuencias de entrada.

Frecuencia(Hz)	Vin(V)	Vout(V)
50	0.040	1.27
60	0.040	1.37
70	0.040	1.46
80	0.040	1.57
90	0.040	1.71
100	0.040	1.85
110	0.040	1.97
120	0.040	2.11

*Tabla 3. Voltaje salida en función de la frecuencia para una entrada de 40mV*

Frecuencia(Hz)	Vin(V)	Vout(V)
50	0.080	1.50
60	0.080	1.70
70	0.080	1.94
80	0.080	2.18
90	0.080	2.45
100	0.080	2.67
110	0.080	2.86
120	0.080	3.00

*Tabla 4. Voltaje salida en función de la frecuencia para una entrada de 80mV*

Frecuencia(Hz)	Vin(V)	Vout(V)
50	0.120	1.80
60	0.120	2.12
70	0.120	2.47
80	0.120	2.81
90	0.120	3.10
100	0.120	3.34
110	0.120	3.51
120	0.120	3.63

*Tabla 5. Voltaje salida en función de la frecuencia para una entrada de 120mV*

Frecuencia(Hz)	Vin(V)	Vout(V)
50	0.160	2.10
60	0.160	2.50
70	0.160	2.96
80	0.160	3.33
90	0.160	3.64
100	0.160	3.87
110	0.160	4.04

120	0.160	4.17
-----	-------	------

*Tabla 6. Voltaje salida en función de la frecuencia para una entrada de 120mV*

Frecuencia(Hz)	Vin(V)	Vout(V)
50	0.200	2.40
60	0.200	2.91
70	0.200	3.40
80	0.200	3.79
90	0.200	4.10
100	0.200	4.33
110	0.200	4.52
120	0.200	4.64

*Tabla 7. Voltaje salida en función de la frecuencia para una entrada de 200mV*

Se puede apreciar como la ganancia del sistema se mantiene de forma lineal a lo largo de las frecuencias correspondientes al andar del ser humano. De esta manera, se podrá corregir por software la amplitud recibida para poder medir la variación correspondiente a la señal recibida y así poder identificar el número de personas presente.

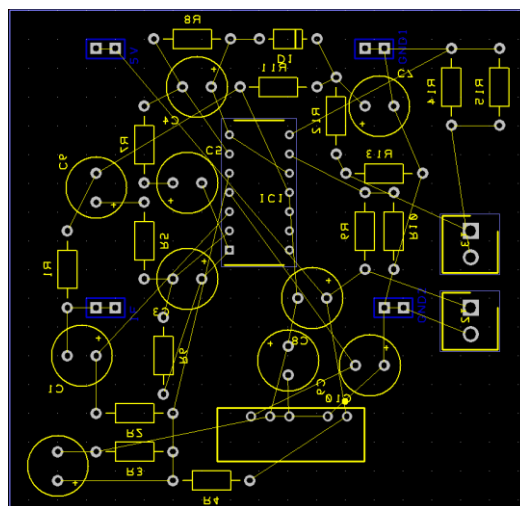
#### 4.4 Diseño de la PCB

Una vez comprobado el funcionamiento del sistema y obtenidos los datos para aplicar las correcciones sobre las señales, se pasa a efectuar el diseño de la PCB para tener un montaje mucho más compacto y que facilita el uso.

Para generar PCB existen multitud de programas que permiten la creación de las placas, como por ejemplo DesignSpark PCB, que te permite importar fácilmente los footprints necesarios de cualquier componente utilizando el programa "Library Loader".

Lo primero que hay que hacer es crear un esquemático con el circuito completo que se ha diseñado previamente.

Una vez concluido con el esquemático se pasará a establecer la posición que tendrán los componentes dentro de la placa. Hay que tener en cuenta que elementos están conectados entre sí para poder montarlos lo más cercanos posible y así reducir al máximo la longitud de las pistas.



Una vez colocados todos los componentes, se tiene que proceder a establecer las pistas. Es importante seleccionar adecuadamente los tamaños de los pads, los agujeros, la anchura de las pistas y la distancia entre pistas necesaria.

También es importante tener en cuenta los ángulos de giro de las pistas, ya que si se realizan cambios de dirección de 90 grados pueden aparecer ruidos indeseados en el sistema debidos a interferencias electromagnéticas.

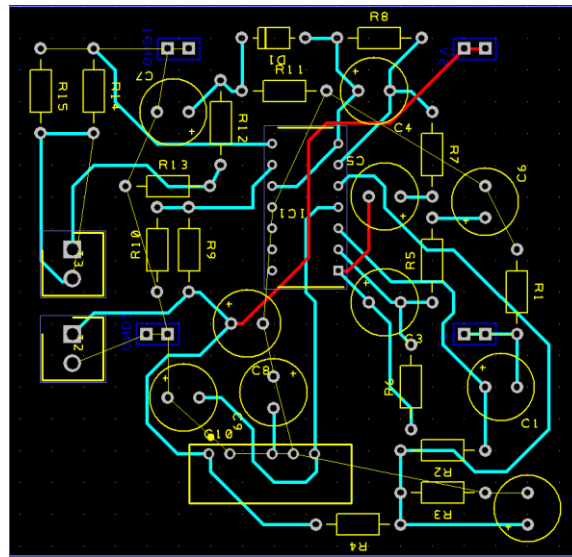


Figura 30. PCB con las pistas que realizan las conexiones

Además, al tener muchos componentes que van a tierra, se ha optado por introducir un plano de tierra de manera que puedan tener fácil acceso y no sea necesario llenar toda la placa de pistas para enlazar los pines como se puede apreciar en la Figura 31.

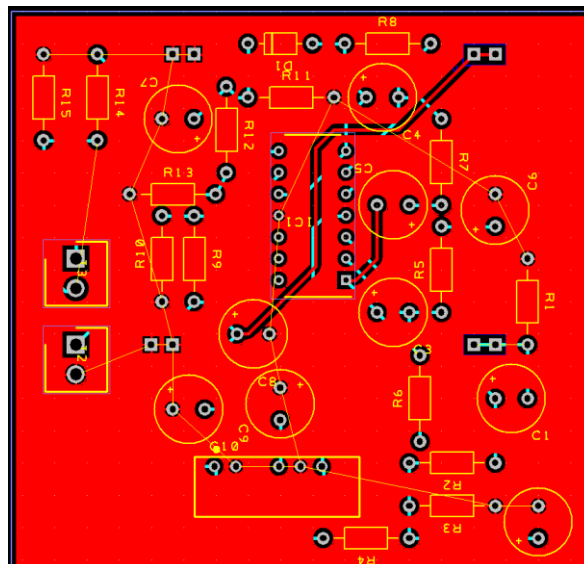
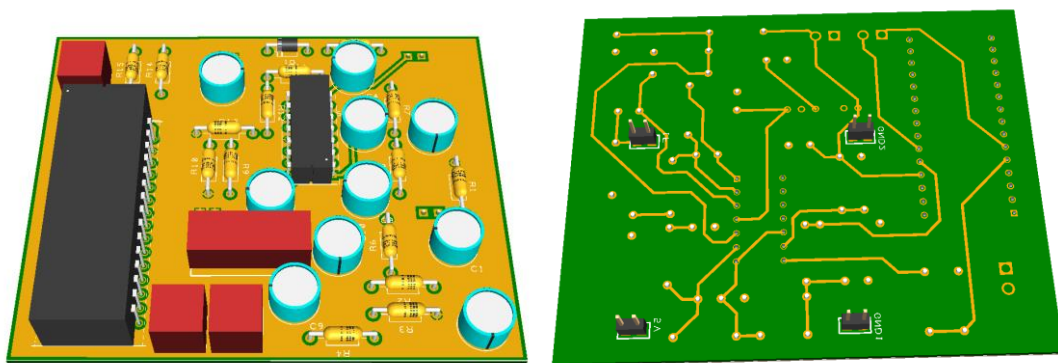


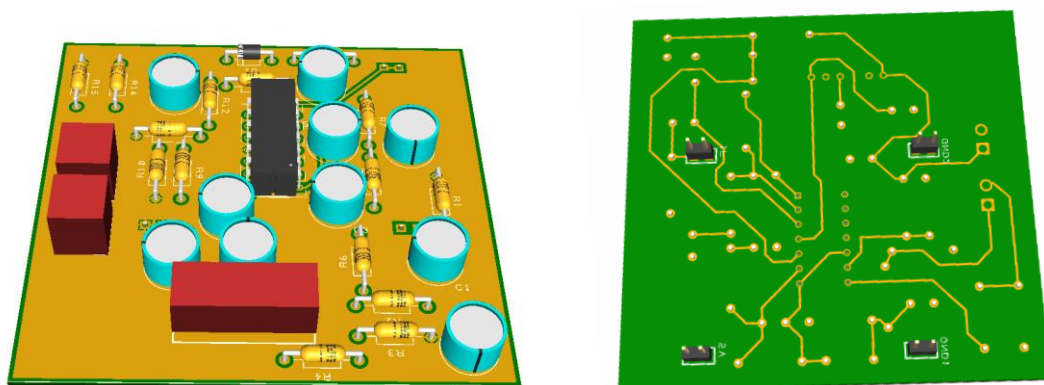
Figura 31. PCB con el plano de masa incluido

Como se van a utilizar dos sensores para la realización del proyecto, va a hacer falta la realización de dos placas. Además, se ha escogido realizar la otra PCB con el Arduino incrustado para facilitar el montaje y quede de la manera más compacta posible.

En las siguientes figuras, se puede observar cómo quedan las pcb en la simulación 3D que incorpora DesignSpark PCB.



*Figura 32. PCB para el sensor con pines para Arduino nano*



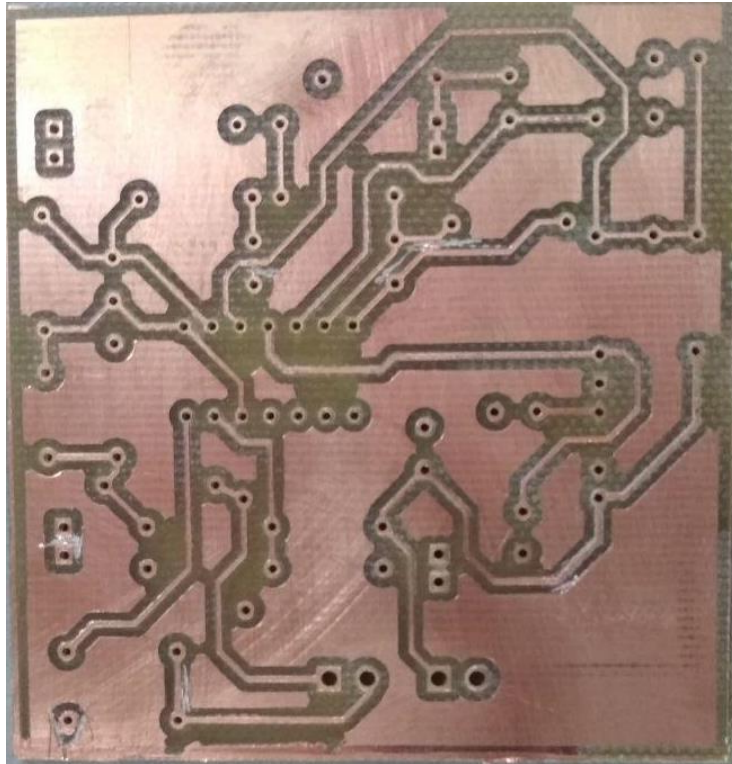
*Figura 33. PCB para el sensor complementario*

Se puede apreciar como en la parte posterior de las PCB se han incluido unos pines que encajan perfectamente con los agujeros que dispone el sensor HB100 como bien indica su hoja de características [9].

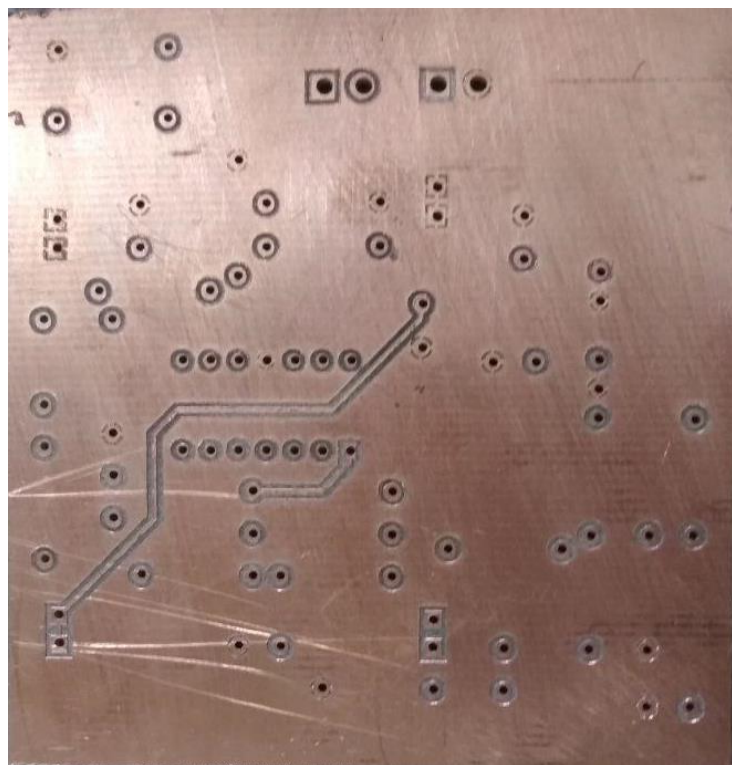
Para realizar la PCB se ha recurrido a la fresadora que dispone la universidad pública de navarra en el laboratorio de electrónica avanzada en el segundo piso del edificio de los tejos.

La técnica para la realización de la placa se basa en eliminar de una placa de cobre los espacios entre pistas dejando de esta manera únicamente el cobre correspondiente al circuito y los planos de masa. En las siguientes figuras se puede apreciar el resultado obtenido.



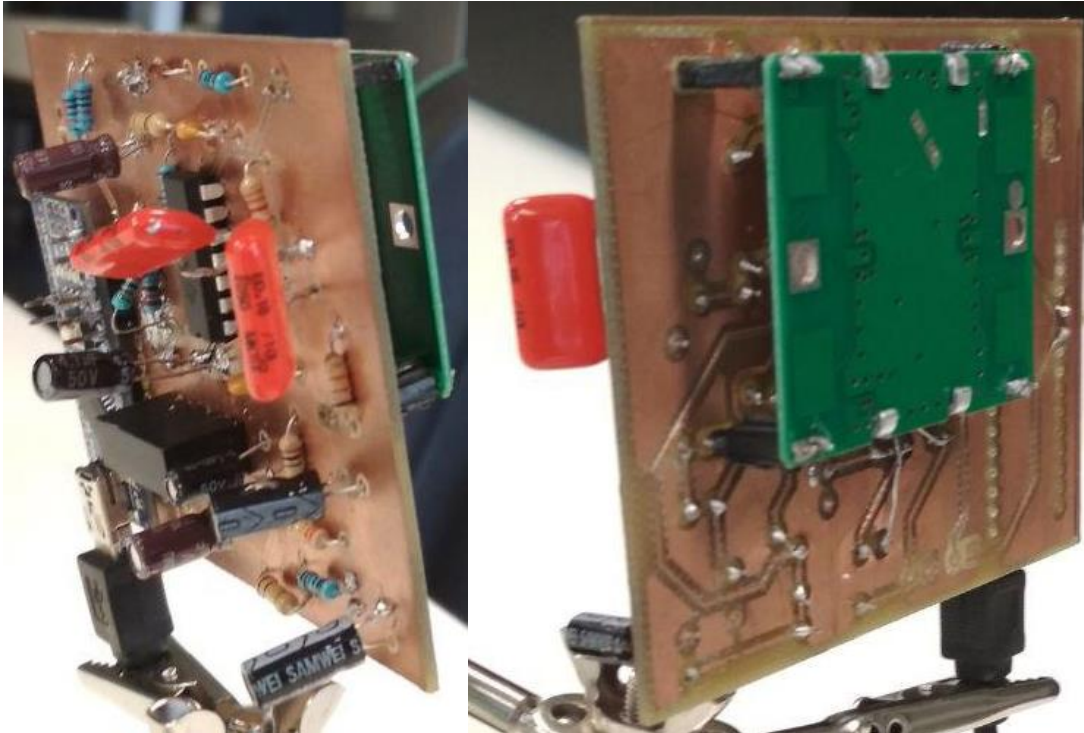


*Figura 34. Imagen de la parte frontal de la PCB*



*Figura 35. Imagen de la parte posterior de la PCB*

Una vez realizada la PCB se procede a soldar los componentes en la placa. Para ello se han utilizado las herramientas disponibles en el laboratorio de electrónica básica en el primer piso del edificio de los tejos. Quedando finalmente un bloque bastante compacto como se puede apreciar en la Figura 36.



*Figura 36. PCB montada con los componentes soldados*

#### 4.5 Diseño del software

El desarrollo del software ha sido realizado por partes ya que hay dos parámetros distintos que se desean medir. Por un lado, la frecuencia de la señal recibida y por otro, la amplitud obtenida a la salida del sistema.

Para medir la frecuencia, como se ha comentado previamente, se va a utilizar un pin digital de Arduino. Las funciones con las que se obtiene la frecuencia de la señal son “pulseIn(PIN\_NUMBER, HIGH)” y “pulseIn(PIN\_NUMBER, LOW)”. De esta manera se obtiene el tiempo que se mantiene la señal en una de las posiciones [11]. Realizando estos dos comandos de uno después del otro y sumando los resultados obtendremos la frecuencia de la señal. Posteriormente vía software utilizando la formula (17) sabremos la velocidad correspondiente a esa frecuencia.

En la Figura 37 se puede apreciar el diagrama de flujo del programa que mide la frecuencia de la señal obtenida.

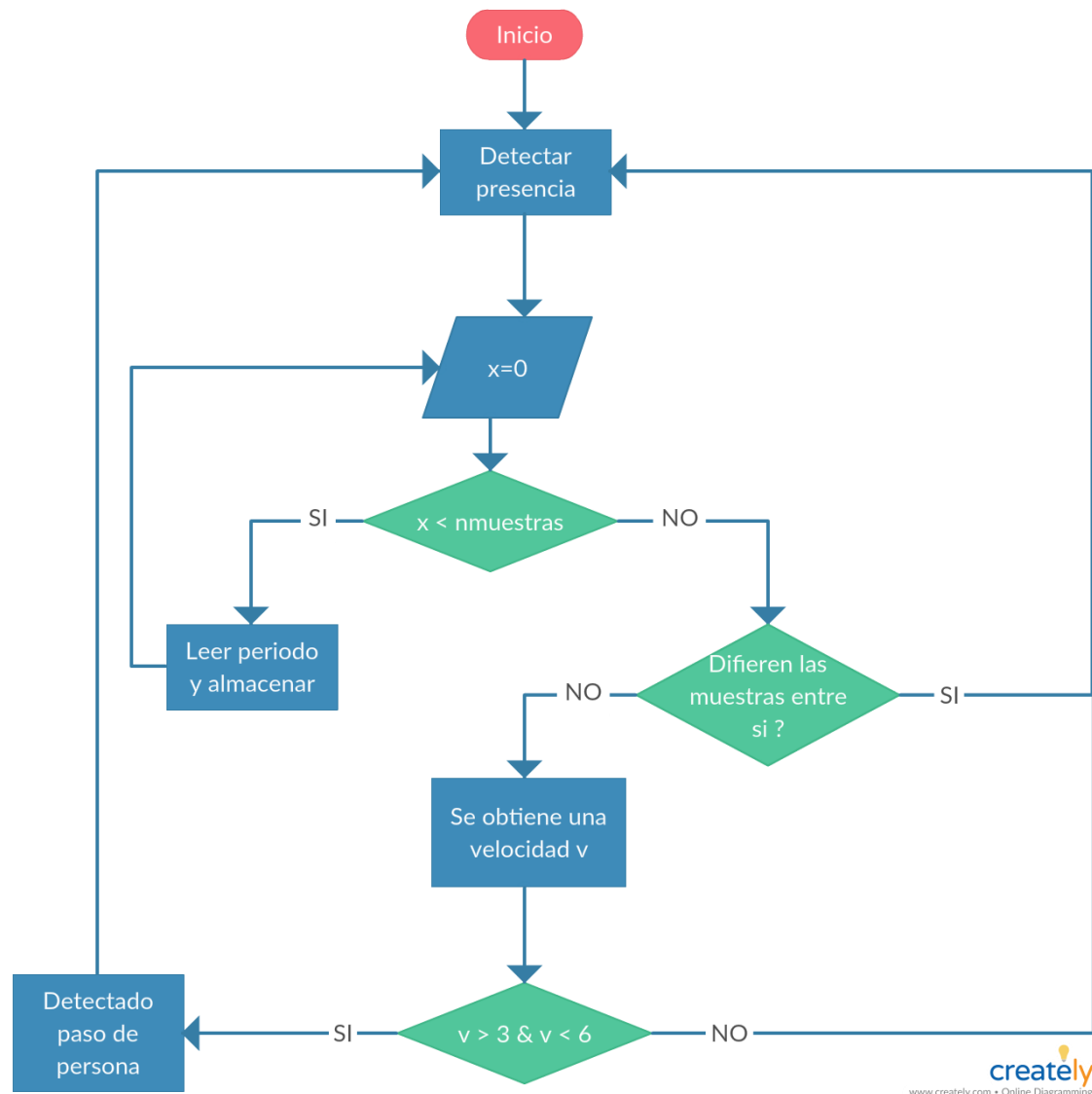


Figura 37. Diagrama de flujo software para leer la frecuencia

Tras revisar los resultados obtenidos y visto que las medidas obtenidas son bastante fiables como se puede observar en el apartado de Resultados obtenidos del montaje experimental hace falta incluir la medida de la amplitud para ver qué diferencias se pueden apreciar con el paso de distinto número de personas.

Para ello se ha optado por tomar una muestra de la amplitud en el pin analógico de Arduino en cada periodo de manera que se pueda procesar y tratar de obtener por un lado una media de amplitud y por otro ver si esta amplitud crece o decrece con el tiempo para detectar si la persona está acercándose o alejándose.

Además, en esta revisión del programa se ha modificado de tal manera que no establecemos nosotros el número de muestras que va a tomar. En este caso se va a tomar un numero de muestras equivalentes al tiempo que se ha encontrado la persona en el rango de detección.

Para poder implementar esto lo que vamos a hacer es establecer un tiempo de espera máximo entre muestras que en caso de sobrepasarse detenga la toma de muestras y realice el procesamiento de las muestras tomadas.

Para la velocidad del caminar del ser humano no vamos a encontrarnos con velocidades menores a 3 Km/h, por lo que se puede obtener a partir de su periodo un tiempo de espera máximo que podría utilizarse como indicativo de que el paso de una persona ha finalizado. Es importante tener en cuenta que con las modificaciones realizadas el sistema se optimiza para la detección de personas ya que el tiempo de espera se establece para buscar velocidades en torno a una frecuencia.

$$f = 19,49 * 3 = 58,47 \quad (31)$$

$$T_{MAX} = \frac{1}{58,47} = 17102 \mu S \quad (32)$$

Una vez establecido el tiempo de espera, hace falta aplicarlo sobre el sketch. Se cambian las condiciones del bucle comparando el periodo obtenido con el tiempo de espera máximo. Además es interesante incluir en la función pulsein() de Arduino, el parámetro timeout [11] con el valor que hemos establecido. De esta manera logramos que no se quede infinitamente esperando nuevas muestras. Si ocurre que el tiempo que transcurrido sobrepasa el timeout la función nos devuelve un valor de 0. De esta manera podemos romper el bucle en el momento que deje de detectar presencia. Una vez fuera del bucle hará falta comprobar si la velocidad se encuentra en el rango deseado. Una vez comprobado esto se procede a procesar la amplitud.

Otro elemento importante en la detección de personas es que es interesante tratar de identificar la dirección en la que se encuentra moviéndose la persona. Para ello al disponer únicamente de una señal y no tener las componentes en fase y cuadratura se pretende detectar la dirección tomando un numero de muestras de amplitud a lo largo del paso de la persona por la zona de detección. Con estos datos se pretende determinar la pendiente de regresión lineal [12]. La ecuación para obtener la pendiente es

$$b = \frac{n \sum XY - (\sum X \sum Y)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (33)$$

De esta manera obtenemos una estimación y si la pendiente es positiva nos indicará que se estaba acercando al sensor y si es negativa en cambio indicara que la persona iba en la otra dirección.

Para tratar de estimar el número de personas que están pasando en un momento dado, se va normalizar la amplitud obtenida. Para ello se establece una relación entre la ganancia y la frecuencia. Se ha optado por normalizarla sobre la frecuencia de 60hz que es la correspondiente al mínimo de velocidad seleccionado para la detección del caminar.

De esta manera utilizando la pendiente lineal con la que se diseñó el filtro obtenemos la amplitud normalizada utilizando la siguiente ecuación,

$$G = 100 * (f - 60) + 4000 \quad (34)$$

$$A_{norm} = A_{media} \frac{4000}{G} \quad (35)$$

Siendo  $A_{media}$  la amplitud media correspondiente a las muestras obtenidas y  $f$  la frecuencia detectada en las muestras.

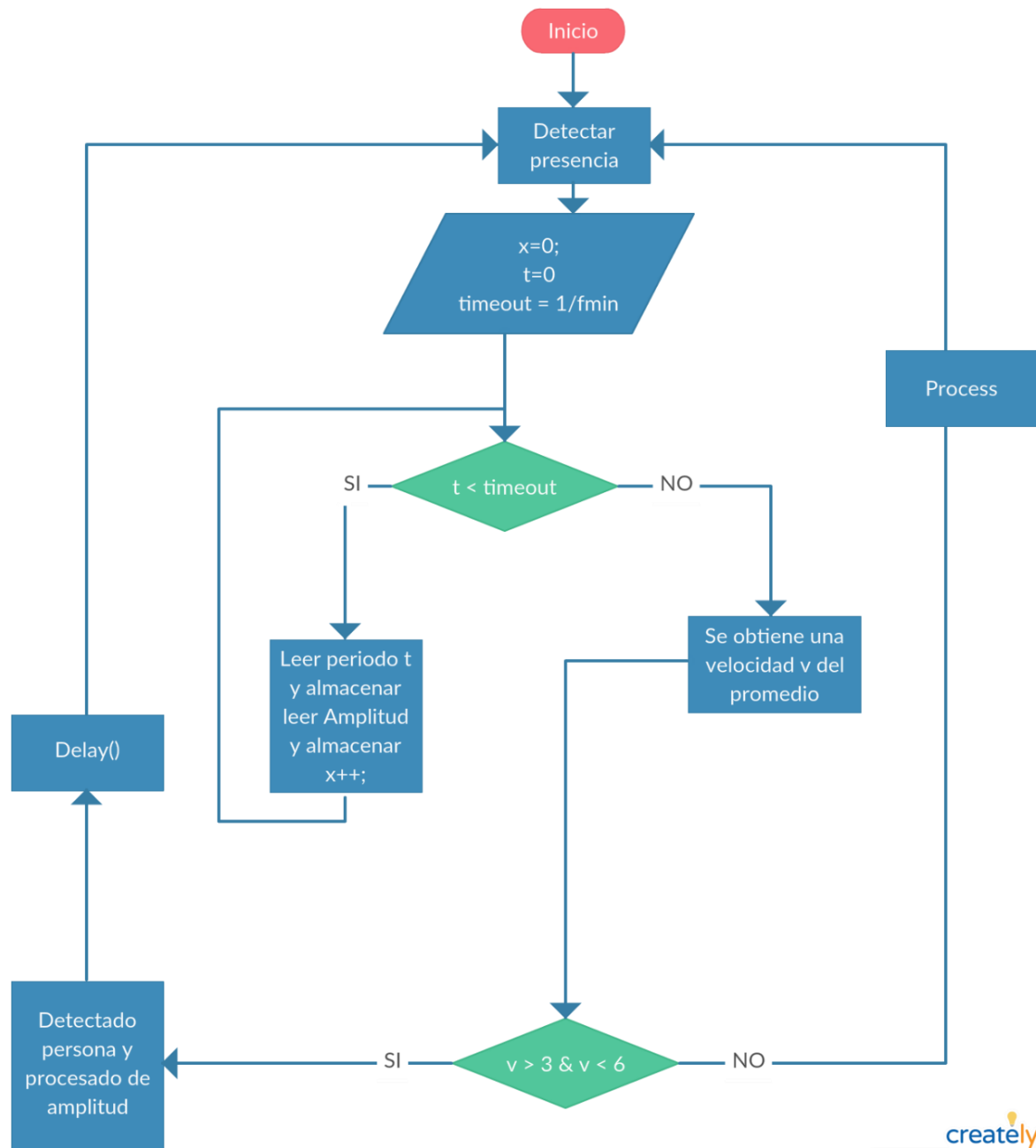


Figura 38. Diagrama de flujo software completo

## 5. Presupuesto

Es importante realizar un análisis del coste total que supone un sistema de este estilo a la hora de realizar comparaciones con otras opciones de detección. Para el coste material se ha contado todos los elementos necesarios para tener el diseño con dos sensores.

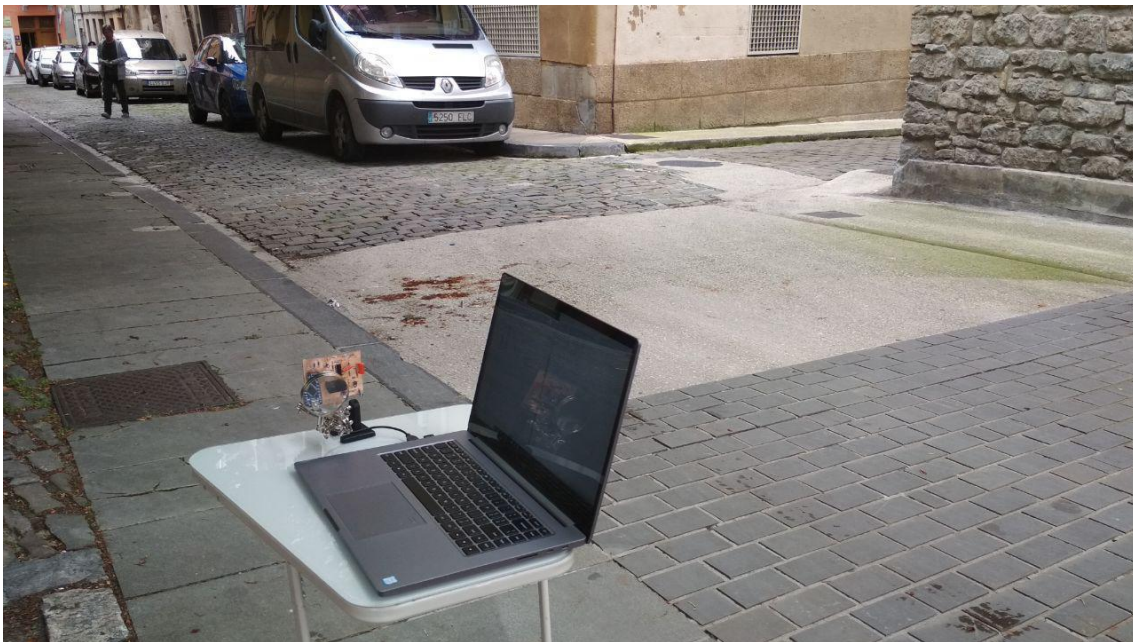
Artículo	Unidades	Precio Unidad	Precio Total
Arduino Nano 3.0	1	20,00 €	20,00 €
Cable USB 2.0 a mini USB 3M M/M	1	3,25 €	3,25 €
Amplificador operacional LM324N	2	0,34 €	0,68 €
Convertidor DC/DC 5V-12V	2	4,30 €	8,60 €
Sensor HB100	2	2,65 €	5,30 €
Resistencias Varias	30	0,10 €	3,00 €
Condensador 100 uF	2	0,31 €	0,62 €
Condensador 10uF	2	0,19 €	0,38 €
Condensador 4,7 uF	4	0,13 €	0,52 €
Condensador 1uF	4	0,06 €	0,24 €
Condensador 0,18 uF	4	0,35 €	1,40 €
Condensador 1nF	4	0,21 €	0,84 €
Diodo 1N4148	2	0,12 €	0,24 €
Terminales entrada 2 pin	5	0,56 €	2,79 €
<b>Total Material</b>		<b>47,86 €</b>	



## 6. Resultados y discusión

### 6.1 Prueba numero 1

Tras haber realizado el montaje de todos los componentes sobre la PCB, se procede a realizar una primera prueba para comprobar su funcionamiento. Se ha montado el sistema cerca de una acera en una calle de manera que podamos ver pasar tanto peatones como vehículos para poder estudiar su comportamiento. Para esta prueba se ha utilizado la primera versión del software.



*Figura 39. Montaje Realizado para la prueba 1*

Los resultados obtenidos de esta primera prueba se pueden observar en la Tabla 8. En dicha tabla se muestran varias columnas, una para saber si era vehículo o persona, otra para ver si ha detectado algo, una tercera para añadir observaciones y una última para indicar si ha sido correcta o no la detección.



N	Tipo	Detectada	Observaciones	Correcto
1	Persona	si		Si
2	Coche	si		Si
3	Persona	si		Si
4	Persona	si		Si
5	Persona	si		Si
6	Persona	si		Si
7	Persona	si	x2 veces detectada	si
8	Persona	si	x2 veces detectada	no
9	Coche	si		Si
10	Coche	si		Si
11	Persona	si		Si
12	Coche	Si		Si
13	Coche	si		Si
14	Coche	Persona	Pasaba muy despacio	No
15	Persona	si		Si
16	Coche	si		Si
17	Persona	si	x2 veces	Si
18	Persona	si	x2	No
19	Persona	SI		Si
20	Coche	SI	x2 veces	Si
21	Coche	SI	x2 veces	No
22	Coche	SI	x2 veces	Si
23	Coche	SI	x2 veces	No
24	Persona		DESPUES DEL PASO DE LOS COCHES	NO
25	Coche		DESPUES DEL PASO DE LOS COCHES	NO
26	Coche	SI	x2 veces	SI
27	Coche	SI	x2 veces	NO
28	Persona	SI		SI

Tabla 8. Resultados de la prueba 1

Tras la primera prueba con pocas muestras se puede apreciar una tasa de acierto del 71,43 %. Los errores aparecen principalmente debido a dobles detecciones en el paso de las personas o coches por lo que para la segunda prueba una alternativa es utilizar un mayor retardo tras realizar la detección.

## 6.2 Prueba numero 2

Tras realizar la modificación del software se procede a realizar una segunda prueba en la que se pretende ver el comportamiento de los cambios realizados. En primer lugar, ver el funcionamiento del nuevo sistema que obtiene un numero de muestras en función del tiempo que se encuentra en el rango de detección. En segundo lugar, ver que efectividad tiene en la detección de personas. En tercer lugar, tratar de diferenciar amplitudes medias para el paso de diferente número de personas para cada una de las direcciones y por último, Lograr saber si están yendo en una dirección o en otra.

Para esta prueba se ha seleccionado otro lugar, por el que pasase más gente para obtener un mayor número de muestras.



*Figura 40. Montaje realizado para la prueba 2.*



Figura 41. Montaje realizado para la prueba 2

N	Tipo	Detectada	Velocidad	Direccion	Amplitud media	N persones	Correcto
1	p	si	4.54	sale	1.64	1p	si
2	p	si	4.91	sale	4.94	2p	entrar
3	p	no	no	sale	No	1p	no
4	p	si	4,49	sale	1.44	1p	entrar
5	p	si	4,71	sale	1,34	2p	si
6	p	si	3,9	entra	1,27	1p	sale
7	p	si	4,64	sale	ind	1p	entrar
8	p	si	4,77	sale	1.96	1p	si
9	p	si	4,98	entra	3.45	2p	si
10	p	si	5.2	entra	4.02	1p	si
11	p	si	4.55	sale	3.85	2p	si
12	p	si	4.86	sale	2,79	2p	si
13	p	si	5,33	sale	1,87	1p	si
14	p	si	1.45	sale	8,74	6p	si
15	p	si	4,39	entra	1,34	2p	si
16	p	si	5,28	sale	2,24	2p	si
17	p	si	5,69	sale	2,04	2p	si
18	p	si	5,03	entra	1,39	1p	si
19	p	si	4,46	sale	2,02	2p	si
20	p	si	1,45	entra	3,97	1p	sale
21	p	si	3,98	sale	2,23	1p	entrar

22	p	si	1,84	entrar	1,84	3p	si
23	p	no	no	sale	No	1p	no
24	p	si	5,09	sale	1,47	2p	entrar
25	p	si	4,57	sale	2,42	1p	si
26	p	si	4,87	entra	2,09	1p	si
27	p	si	5,13	sale	ind	1p	si
28	p	si	5,05	entra	ind	1p	si
29	p	si	5,6	entra	1,38	1p	si
30	p	si	4,67	entra	1,34	1p	sale
31	p	si	4,55	sale	1,68	1p	si
32	p	si	4,13	sale	1,31	2p	si
33	p	si	6,6	entra	2,88	1p	si
34	p	si	6,05	sale	2,35	1p	si
35	p	si	5,43	entra	2,2	2p	si
36	p	si	5,55	sale	3,19	1p	si
37	p	si	5,37	sale	9,35	2p	si
38	p	si	5,18	sale	1,49	2p	si
39	p	si	6,59	sale	3,45	2p	entrar
40	p	si	5,41	entra	4,64	1p	si
41	p	si	5,35	entra	2,1	1p	sale
42	p	si	4,83	sale	2,23	2p	si
43	p	si	4,72	entra	3,78	1p	si
44	p	si	6,56	entra	6,64	1p	si
45	p	si	5,56	entra	1,99	1p	sale
46	p	si	4,86	sale	27,86	2p	si
47	p	si	4,86	entra	1,35	2p	sale
48	p	si	4,69	sale	4,3	2p	entrar
49	p	si	6,05	sale	1,92	2p	si
50	p	si	5,58	sale	3,36	1p	entrar
51	p	si	6,5	sale	3,84	2p	si
52	p	si	5,57	sale	1,61	1p	si
53	p	si	5,43	sale	11	1p	si
54	p	si	5,28	entra	3,13	1p	si
55	p	si	4,57	sale	3,45	1p	si
56	Falso positivo						no
57	p	no		sale			no
58	p	si	5,67	sale	4,29	1p	si
59	p	si	5,42	sale	2,87	3p	si
60	p	si	5,54	sale	4,99	1p	si
61	p	si	7,05	sale	2,88	1p	si
62	p	si	7,03	sale	23,3	1p	si
63	p	si	5,45	sale	2,86	2p	entrar
64	p	si	6,85	sale	2,86	1p	entrar
65	p	si	5,17	sale	15,75	1p	si
66	p	si	4,54	sale	4,54	1p	si

67	Falso positivo						no
68	p	si	4,6	entra	1,41	1p	si
69	p	si	5,56	sale	9,3	2p	entrar
70	p	si	4,75	entra	1,61	1p	si
71	p	si	4,16	entra	6,08	2p	si

Tabla 9. Resultados de la prueba 2.

Tras revisar los resultados se detecta que hay un fallo al mostrar la amplitud en algunos casos ya que superan los 5V de amplitud por lo que de esta prueba no se pueden sacar conclusiones respecto a la amplitud, pero si alguna sobre la detección de personas y la dirección en la que se mueven. De las muestras tomadas, se ha detectado presencia de personas correctamente el 92,96% de las veces. La dirección correcta en el 69,01% de los casos y ha habido un 7,04% de falsos positivos.

### 6.3 Prueba numero 3

Para la tercera prueba se ha corregido el problema que muestra la amplitud y ver si podemos apreciar diferencias entre el paso de diferente número de personas con el objetivo de intentar ser capaces de diferenciar el número de personas que han pasado basándonos en la amplitud normalizada.

N	Detectada	Velocidad	Direccion	Amplitud media	N personas	Correcto
1	si	5,38	sale	1,61	2	si
2	si	4,84	entra	0,79	1	sale
3	si	7,12	sale	1,11	1	si
4	si	5,11	sale	1,76	1	entra
5	si	5,32	entra	0,82	2	sale
6	si	4,38	entra	2,4	2	entra
7	si	5,17	entra	1,888	1	si
8	si	5,47	entra	0,66	2	si
9	si	5,19	sale	1,52	2	si
10	si	5,41	sale	1,68	1	si
11	si	4,89	sale	1,56	2	si
12	si	5,94	entra	1,34	1	si
13	si	6,25	sale	1,01	1	si
14	si	5,28	sale	0,71	1	si
15	si	5,75	sale	1,39	2	si
16	si	6,26	sale	1,84	1	si

17	si	4,72	sale	2,21	2	si
18	no		sale		1	no
19	si	6,55	sale	1,01	3	entra
20	si	6,79	sale	0,95	1	si
21	si	5,92	sale	1,35	1	si
22	si	5,47	ambas	1,17	2	entra
23	si	4,99	entra	0,75	1	si
24	si	5,16	ambas	0,87	1	si
25	si	5,31	entra	0,77	2	si
26	si	4,63	sale	0,8	2	si
27	no		entra		1	no
28	si	5,84	sale	1,84	1	entra
29	si	5,11	sale	1,24	1	si
30	si	5,86	entra	1,42	1	si
31	si	5,26	entra	0,82	3	si
32	si	4,45	sale	2,23	1	si
33	si	5,13	entra	0,72	1	entra
34	si	5,81	sale	1,17	1	si
35	si	6,99	sale	0,75	2	entra
36	si	5,91	entra	0,77	1	si
37	si	5,54	entra	0,68	1	si
38	si	5,44	entra	0,69	1	si
39	si	6,38	sale	1,36	1	si
40	si	5,51	sale	0,78	1	si
41	no		sale		1	no
42	no		entra		1	no
43	si	4,95	sale	1,13	1	si
44	si	5,38	entra	0,9	1	si
45	si	4,52	sale	2,45	3	entra
46	si	5,39	entra	0,68	1	si
47	si	5,62	entra	1,02	1	entra
48	si	4,93	sale	1,02	1	si
49	si	5,18	entra	0,8	1	si
50	si	5,28	entra	0,78	2	sale
51	si	4,27	sale	2,91	2	entra
52	si	4,63	entra	2,37	2	si
53	si	4,63	sale	2,73	3	si
54	no		entra		1	no
55	si	5,74	sale	1,08	1	si
56	si	6,1	sale	1,26	3	si
57	si	6,2	sale	1,23	2	entra
58	si	6,46	ambas	0,74	1	si
59	si	6,05	sale	1,37	2	si



60	si	6,51	sale	1,49	1	si
61	si	4,7	entra	0,79	1	si
62	no		entra		1	no
63	si	4,81	entra	1,08	1	si
64	si	5,48	entra	1,6	1	si
65	si	5,56	sale	1,29	1	entra
66	si	6,42	sale	1,32	2	si
67	si	4,92	entra	0,91	2	sale
68	si	5,31	entra	0,98	1	si
69	si	5,87	sale	1,3	1	si
70	si	5,43	sale	1,22	2	entra
71	si	6,25	entra	0,76	1	si

En este caso se ve que se mantienen los porcentajes obtenidos anteriormente con un 67,61% de aciertos totales tanto en dirección como en detección. Respecto a la correcta detección de presencia el acierto ha sido del 92,86%.

Respecto a los distintos tamaños de amplitud se puede apreciar una diferencia en los promedios de amplitud correspondientes a distinto número de personas. Para una única persona el valor medio obtenido de todas las muestras se encuentra en torno a 1,14, para dos personas el valor medio obtenido está en 1,38 y para 3 personas el valor medio está en 1,65 de media.

#### 6.4 Discusión

Con las pruebas realizadas se puede apreciar en primer lugar que se detecta correctamente el paso de personas. Pese a que en algunos casos personas que pasan corriendo o personas en bicicleta con detectadas a una velocidad correspondiente a las personas y además se ha podido apreciar que esto ocurre cuando las personas están pasando por la parte trasera del sensor. Tras realizar unas pruebas se ha observado que el sensor detecta movimiento en su parte trasera si pasa muy cerca por lo que sería interesante aislar la parte trasera del sensor para ver tratar de evitar estos errores.

Por otro lado, se ha apreciado que el rango de detección tiene bastante longitud debido a la gran ganancia del sistema. Quizás sería interesante reducir la ganancia para acotar el rango de detección en lugar de utilizar retardos temporales vía software tras la detección.

Tras analizar los resultados obtenidos en la identificación de la dirección en la que se están moviendo las personas se ha visto que se ha obtenido un acierto en torno al 70% pero creo que se podría optimizar bastante aislando la parte trasera del sensor y tratando de hacer las antenas más directivas para que como se ha comentado

anteriormente no comience a detectar la presencia cuando se encuentren cerca de la parte trasera del sensor.

Para tratar de detectar el número de personas simultaneas que están pasando las pruebas realizadas no son concluyentes. Se aprecia una diferencia en el valor medio, pero es necesario tener un mayor número de muestras y aplicando además los cambios propuestos para ver si se puede obtener una mayor diferencia. Además de usarse otro sensor que estuviese al otro lado del camino para promediar la amplitud con él y así eliminar la diferencia de amplitud generada por el hecho de pasar más cerca o más lejos del sensor.



## 7. Conclusiones

- Se ha desarrollado un sistema de detección de personas utilizando Arduino y un sensor basado en el efecto Doppler
- El diseño y simulación del circuito de acondicionamiento ha sido realizado con Orcad.
- Se ha implementado en una PCB creando una placa compacta.
- La programación ha sido realizada con Arduino IDE y se han implementado los algoritmos necesarios para tratar de detectar el paso de personas, la cantidad y la dirección.
- Se ha logrado detectar la presencia de personas en un porcentaje superior al 90%
- Se ha conseguido detectar la dirección en la que se estaban moviendo las personas con una efectividad en torno al 70%.
- No se han obtenido datos concluyentes sobre la capacidad de detectar el número de personas que pasan de manera simultánea.

## 8. Líneas Futuras

El presente proyecto fin de grado tiene distintas posibilidades de cara a mejoras sus posibilidades o adaptarlo para otros fines. Algunas de estas podrían ser las siguientes:

- Se podría optimizar la detección creando algún tipo de antena de bocina que aislé la parte trasera de las antenas y optimice la directividad de las antenas.
- Incluir otro sensor para colocar al otro lado del camino de manera que se pueda leer obtener un valor medio de amplitud que no dependa de la distancia a la que se encuentre del sensor.
- Incluir un módulo 3G para enviar los datos de manera remota a un servidor externo.
- Añadir una batería y un sistema de carga solar de manera que pueda tener una gran autonomía.
- Añadirle un módulo de reloj para poder establecer la hora de paso de las personas de manera exacta.
- Optimizar el tiempo de uso para reducir el consumo utilizando interrupciones o un reloj para activarlo únicamente durante cierto tiempo que se desee usar.
- Adaptar su uso para que actúe sobre un relé que habrá una puerta o encienda una luz.
- Implementar un sistema de comunicación inalámbrica crear una red de sensores que transmitan con un largo alcance y bajo consumo utilizando bandas libres como puede ser LoRa.

## Índice de figuras

Figura 1. Representación de una onda acústica en movimiento [5].....	11
Figura 2. Módulo HB100.....	12
Figura 3. Diagrama de bloques HB100 .....	13
Figura 4. Diagramas de radiación del sensor HB100.....	14
Figura 5. Hoja de características del sensor HB100 .....	14
Figura 6. Logo Arduino .....	16
Figura 7. Tabla comparativa de placas Arduino .....	17
Figura 8. Arduino nano.....	18
Figura 9. Hoja de características Arduino nano .....	18
Figura 10. Arduino IDE.....	19
Figura 11. Monitor serie Arduino IDE.....	20
Figura 12. Serial Plotter Arduino IDE.....	20
Figura 13. Circuito de acondicionamiento propuesto por el fabricante .....	24
Figura 14. Filtro paso banda inversor.....	25
Figura 15. Respuesta en frecuencia del circuito de acondicionamiento propuesto por el fabricante .....	26
Figura 16. Circuito Acondicionamiento adaptado .....	27
Figura 17. Respuesta en Frecuencia del circuito de acondicionamiento modificado.....	28
Figura 18. Comparador con amplificadores operacionales .....	28
Figura 19. Comportamiento de la salida respecto a la entrada del comparador .....	29
Figura 20. Circuito Integrado LM324N .....	29
Figura 21. Diagrama de bloques del LM324N .....	30
Figura 22. Circuito rectificador con filtro .....	31
Figura 23. Divisor de tensión.....	31
Figura 24. Parte del circuito que establece el nivel sobre el que oscila el sensor .....	32
Figura 25. Primera etapa del circuito de acondicionamiento .....	33
Figura 26. Convertidor 5V-12V traco power TMA-0512D.....	34
Figura 27. Recomendaciones de valores de condensadores para compensar el ruido generado por el convertidor.....	35
Figura 28. Esquemático circuito completo para PCB .....	38
Figura 29. Footprints de los componentes colocados sobre la PCB. ....	38
Figura 30. PCB con las pistas que realizan las conexiones .....	39
Figura 31. PCB con el plano de masa incluido.....	39
Figura 32. PCB para el sensor con pines para Arduino nano .....	40
Figura 33. PCB para el sensor complementario .....	40
Figura 34. Imagen de la parte frontal de la PCB.....	41
Figura 35. Imagen de la parte posterior de la PCB.....	41
Figura 36. PCB montada con los componentes soldados .....	42
Figura 37. Diagrama de flujo software para leer la frecuencia .....	43
Figura 38. Diagrama de flujo software completo.....	46
Figura 39. Montaje Realizado para la prueba 1 .....	48
Figura 40. Montaje realizado para la prueba 2. ....	50
Figura 41. Montaje realizado para la prueba 2 .....	51

## Bibliografía

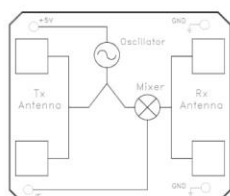
- [1] historylearningsite, «historylearningsite,» [En línea]. Available: <https://www.historylearningsite.co.uk/world-war-two/world-war-two-in-western-europe/battle-of-britain/radar/>.
- [2] M. I. Skolnik, «britannica,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/technology/radar/History-of-radar>.
- [3] NPTEL, «NPTEL.AC.IN,» [En línea]. Available: <http://nptel.ac.in/courses/101108056/module1/lecture2.pdf>.
- [4] F. BERGER, «ieeexplore.ieee.org,» [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4201534>.
- [5] A. Ciencias, «Areaciencias.com,» [En línea]. Available: <http://www.areaciencias.com/fisica/efecto-doppler.html>.
- [6] AgilSense, «Nota de aplicaciones,» [En línea]. Available: [https://www.limpkin.fr/public/HB100/HB100\\_Microwave\\_Sensor\\_Application\\_Note.pdf](https://www.limpkin.fr/public/HB100/HB100_Microwave_Sensor_Application_Note.pdf).
- [7] Arduino, «arcuino.cc,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/FAQ#toc2>.
- [8] arduino, «arduino.cc,» [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>.
- [9] AgilSense, «Hoja de características HB100,» [En línea]. Available: [https://www.limpkin.fr/public/HB100/HB100\\_Microwave\\_Sensor\\_Module\\_Datasheet.pdf](https://www.limpkin.fr/public/HB100/HB100_Microwave_Sensor_Module_Datasheet.pdf).
- [10] Aimtec, «Aimtec,» [En línea]. Available:  
] <http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/documents/ApplicationNotes/a016e%20-%20reduction%20of%20output%20ripple%20&%20noise.pdf>.
- [11] A. R. text, «Arduino Reference text,» [En línea]. Available:  
] <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/advanced-io/pulsein/>.
- [12] Stephanie, «Statisticshowto,» [En línea]. Available:  
] <http://www.statisticshowto.com/what-is-a-regression-equation/>.

## Anexos

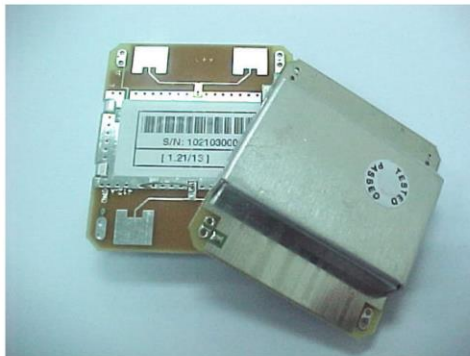
### Anexo I. Hoja de características del módulo HB100

# HB 100 Microwave Sensor Module

## 10.525GHz Microwave Motion Sensor Module



Block diagram and connection



### Description

HB100 Miniature Microwave Motion Sensor is a X-Band Bi-Static Doppler transceiver module. Its built-in Dielectric Resonator Oscillator (DRO) and a pair of Microstrip patch antenna array, make it ideal for OEM usage in motion detection equipment.

This module is ideally suitable for false alarms reduction in intruder detectors when work together with Passive Infrared (PIR) sensor. It can also be used for auto-door opening and vehicle speed measurement.

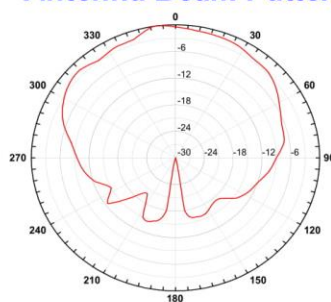
### Features

- Low current consumption
- CW or Pulse operation
- Flat profile
- Long detection range

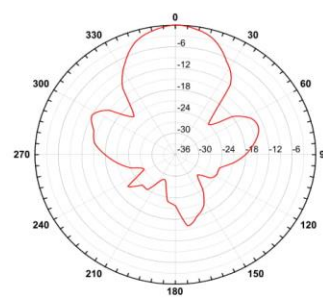
### Applications

- Microwave-PIR motion detector
- Speed measurement
- Lighting control

### Antenna Beam Pattern



Azimuth



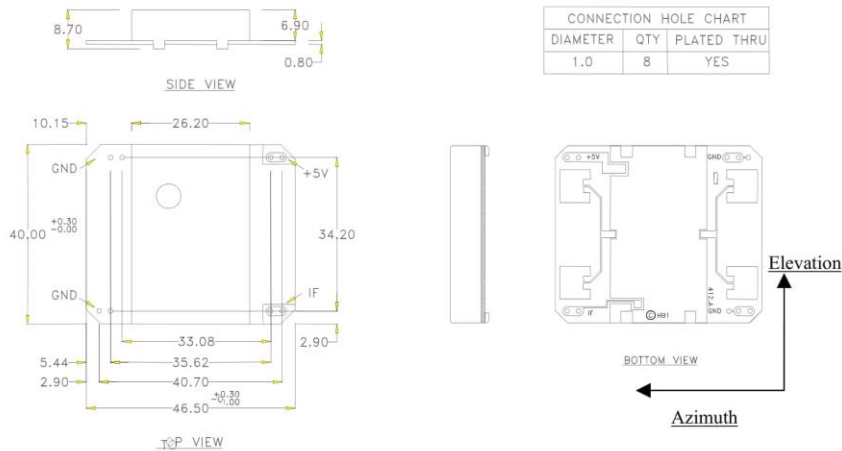
Elevation



## HB 100 MICROWAVE SENSOR MODULE

### Technical Specifications

#### Outline diagram (All dimensions in mm)



Unless noted otherwise, the specifications are measured with +5VDC, CW operation, 12 k $\Omega$  load at ambient temperature of +25°C.

Parameter	Notes	Min	Typ.	Max	Units
Frequency Setting	1	10.520	10.525	10.530	GHz
Radiated Power (EIRP)	1	12	15	20	dBm
Spurious Emission	1			-7.3	dBm
Settling Time			3	6	$\mu$ Sec
Received Signal Strength	2		200		$\mu$ Vp-p
Noise	3			5	$\mu$ Vrms
Antenna Beam-width (3 dB) - Azimuth			80		°
Antenna Beam-width (3 dB) - Elevation			40		°
Supply Voltage		4.75	5.00	5.25	VDC
Current Consumption			30	40	mA
Pulse Repetition Frequency	4		2		KHz
Pulse Width	4	10			$\mu$ Sec
Operating Temperature		-15		55	°C
Weight			8		gm

**Note 1:** The radiated emissions of HB100 is designed to meet the requirements of Federal Communications Commission (FCC) rules, Part 15, Section 15.245 (use within a building or to open building door)

**Note 2:** The Received Signal Strength (RSS) is measured at the total 2 ways path loss of 93dB.

**Note 3:** The noise voltages are measured from 10 Hz to 100 Hz at the output port, inside an Anechoic chamber.

**Note 4:** Pulse operation.

**Note 5:** The design, manufacturing process and specifications of this device are subjected to change without prior notice.

**Note 6:** **CAUTION: ELECTROSTATIC SENSITIVE DEVICE.** Observe precautions for handling and storage.

VER 1.02

## Satcom & Sensor Systems

ST Electronics (Satcom & Sensor Systems) Pte Ltd  
100 Jurong East Street 21, ST Electronics Jurong East Building Level 4, Singapore 609602  
Tel : (65) 6567 6791 Fax : (65) 6567 6370 Email : agilsense@stee.stengg.com  
Website : www.agilsense.com ( Regn: 199103901W )



**Singapore Technologies  
Electronics**

A company of Singapore Technologies Engineering

## Anexo II. Hoja de aplicaciones del sensor HB100



### MSAN-001 X-Band Microwave Motion Sensor Module Application Note

#### 1. Introduction

V1.02

HB Series of microwave motion sensor module are X-Band Mono-static DRO Doppler transceiver front-end module. These modules are designed for movement detection, like intruder alarms, occupancy modules and other innovative ideas.

The module consists of Dielectric Resonator Oscillator (DRO), microwave mixer and patch antenna (see Diagram A).

This Application Note highlights some important points when designing-in HB100 module. Most of the points are also applicable to other models in this series.

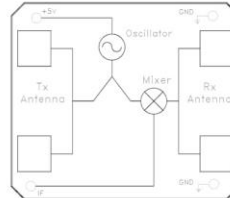


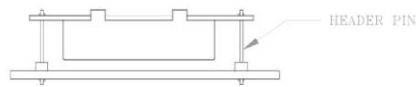
Diagram A: Block Diagram

#### 2. Mounting

Header Pins can be used to connected the terminals (+5V, IF, GND) to the amplifier circuit as well as mounting support. Other mounting methods may be used.

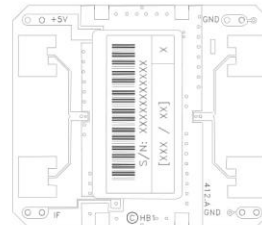
Wave-solder the module onto PCBA is possible but processes has to be evaluated to prevent deterioration. No-cleaning process is recommended.

Caution must be taken to avoid applying pressure or stresses to the chassis of the module. As it may cause performance deterioration.



#### 3. Before Power Up

Connect the power supply, Ground and amplifier circuitry at the designed terminals. Designation of the connection terminals are printed on the PCB as shown in Diagram A.



### Satcom & Sensor Systems

ST Electronics (Satcom & Sensor Systems) Pte Ltd  
100 Juring East Street 21, ST Electronics Juring East Building Level 4, Singapore 609602  
Tel: 65-6567 5791 Fax: 65-6567 4270 Email: agilsense@stee-stong.com  
Website: www.agilsense.com (Reg: 199102801V)



A company of ST Engineering





## MSAN-001 X-Band Microwave Motion Sensor Module Application Note

V1.02

### 4. Power Supply

The module operates at +5 Vdc for Continuous wave (CW) operation (see Annex 1).

The module can be powered by +5V low duty cycle pulsed trains in order to reduce its power consumption. Sample & Hold circuit at the IF output is required for pulse operation (see Annex 2).

### 5. Transmit Frequency

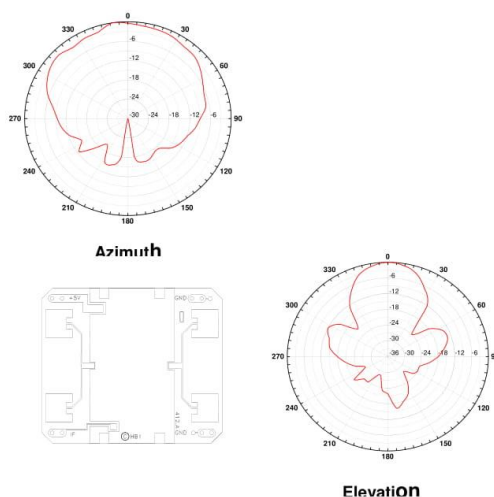
The transmit frequency and power of the module is set by factory. There is no user adjustable part in this device.

The module is a low power radio device (LPRD) or intended radiator. Local radio communication authority regulates use of such a device. Though user license may be exempted, type approval of equipment or other regulation compliance may be required.

Annex 3 shown the allocated frequency in some countries.

### 6. Radiation Pattern

The module to be mounted with the antenna patches facing to the desired detection zone. The user may vary the orientation of the module to get the best coverage. The radiation patterns of the antenna and their half power beam width (HPBW) are shown in below diagram.



## Satcom & Sensor Systems

ST Electronics (Satcom & Sensor Systems) Pte Ltd  
100 Jurong East Street 21, ST Electronics Jurong East Building Level 4, Singapore 609602  
Tel: (65) 6567 6791 Fax: (65) 6567 6370 Email: agilsense@stee.stengg.com  
Website: www.agilsense.com (Regn: 1991039011V)



**ST Electronics**

A company of ST Engineering





**MSAN-001**  
**X-Band Microwave Motion Sensor Module**  
**Application Note**

## 7. Output Signals

V1.02

**Doppler shift** - Doppler shift output from IF terminal when movement is detected. The magnitude of the Doppler Shift is proportional to reflection of transmitted energy and is in the range of microvolts ( $\mu V$ ). A high gain low frequency amplifier is usually connected to the IF terminal in order to amplify the Doppler shift to a processable level (see Annex 1). Frequency of Doppler shift is proportional to velocity of motion. Typical human walking generates Doppler shift below 100 Hz. Doppler frequency can be calculated by Doppler equation in Annex 4.

The Received Signal Strength (RSS) is the voltage measured of the Doppler shift at the IF output. The RSS figure specified in the technical data sheet is level of a 25 Hz Doppler shift, generate from the modulated microwave signal received at the received antenna, The received microwave signal is attenuated to 93 dB below the transmit microwave signal from the transmit antenna of the same unit. The 93dB loss is the total losses combining two ways free space loss (82.4 dB for 30 meters at 10.525 GHz), reflection loss and absorption loss of the target, as well as other losses.

This RSS figure can be view as an approximation of the output signal strength for a human at 15 meters away walking straight to the module at 1.28 km/hour.

Reflection of a human body is varied with the size of the body, clothing, apparels and other environmental factors; RSS measured for two human bodies may vary by 50%.

Circuit designer must take note the maximum and minimum Received Signal Strength (RSS) specified in technical data sheet, when designing the amplifier. Sensitive deviation between modules has to be considered when setting amplifier gain or alarm threshold. On-production-line gain adjustment may be necessary if a narrow window for triggering threshold is required.

**Noise** - The noise figure specified in the technical data sheet is the noise measured in an Anechoic chamber, that shield the unit-under-test from external interference, as well as reflection from surfaces. Hence, the figure is only presenting the noise generated by the internal circuit itself.

Other than noises generate from internal electronic circuit, in actual applications, other noises may be picked up from surrounding, or other part of the electronic circuit.

Specially attention has to be given to the interference pick up from fluorescent light, as the 100/120 Hz noise is closed to the Doppler frequency generated by human movement

On and off switching of certain devices (relay, LED, motor, etc.) may generated high magnitude of transient noise at the IF terminal. Careful PCB layout and time masking is necessary to prevent false triggering.

## Satcom & Sensor Systems

ST Electronics (Satcom & Sensor Systems) Pte Ltd  
100 Jurong East Street 21, ST Electronics Jurong East Building Level 4, Singapore 609602  
Tel : (65) 6567 6791 Fax : (65) 6567 6370 Email : agilsense@stee.stengg.com  
Website : www.agilsense.com ( Regn: 199103901VV)



**ST Electronics**  
A company of ST Engineering



**MSAN-001**  
**X-Band Microwave Motion Sensor Module**  
**Application Note**

**DC Level** - DC level (0.01 to 0.2 Vdc) exists at the IF terminal and its polarity can be positive and negative. Its magnitude may vary over temperature. AC coupling is recommended for IF terminal connection.

## 8. Radiation Safety

Microwave radiation from the module is well below established safety standards for general public environment, like ANSI C95.1-1991 of USA and NRPB-G11 of United Kingdom.

## 9. Handling

The module has been fully tested to specifications. Upon opening, tighten or loosen the chassis will cause performance deterioration.

The module is an electrostatic sensitive device (ESD). Precautions shall be observed for handling and assembly.

## 10. Product Support

Please contact our product support engineers in the factory for technical assistance whenever necessary.

***Product Support (Microwave Sensors)***

***Tel: (65) 6568 7414***

***Fax: (65) 6567 6370***

***e-mail: agilsense@stee.stengg.com***

## Satcom & Sensor Systems

ST Electronics (Satcom & Sensor Systems) Pte Ltd  
100 Jurong East Street 21, ST Electronics Jurong East Building Level 4, Singapore 609602  
Tel: (65) 6567 6791 Fax: (65) 6567 6370 Email: agilsense@stee.stengg.com  
Website: www.agilsense.com (Regn: 199163801W)



**ST Electronics**

A company of ST Engineering







#### Annex 4: Doppler Equation

$$F_d = 2V \left( \frac{F_t}{c} \right) \cos \theta$$

Where

$F_d$  = Doppler frequency

$V$  = Velocity of the target

$F_t$  = Transmit frequency

$c$  = Speed of light ( $3 \times 10^8$  m/sec)

$\theta$  = The angle between the target moving direction and the axis of the module.

If a target is moving straight toward or away from HB100 ( $F_t = 10.525$  GHz) The formula is simplified to:

$$F_d = 19.49V \text{ (Velocity in km/hour) or } 31.36V \text{ (V in mile per hour)}$$

Conversion factor for other frequencies are shown as below:

Frequency	$F_d$ (V in Km/hr)	$F_d$ (V in mph)
9.35 GHz	17.31V	27.85V
9.9 GHz	18.33V	29.49V
10.525 GHz	19.49V	31.36V
10.587 GHz	19.60V	31.54V
10.687 GHz	19.79V	31.84V
24.125 GHz	44.68V	71.89V

#### Satcom & Sensor Systems

ST Electronics (Satcom & Sensor Systems) Pte Ltd  
100 Jurong East Street 21, ST Electronics Jurong East Building Level 4, Singapore 609602  
Tel: (65) 6567 6791 Fax: (65) 6567 6370 Email: agilsense@stee.stengg.com  
Website: www.agilsense.com (Regn: 199103901W)



#### ST Electronics

A company of ST Engineering



## Anexo III. Hoja de especificaciones del circuito integrado LM324N

### LM124-N, LM224-N LM2902-N, LM324-N

SNOSC16D – MARCH 2000 – REVISED JANUARY 2015



www.ti.com

## 6 Specifications

### 6.1 Absolute Maximum Ratings

See <sup>(1)(2)</sup>.

			LM124-N/LM224-N/LM324-N LM124A/LM224A/LM324A		LM2902-N		
			MIN	MAX	MIN	MAX	UNIT
Supply Voltage, V*				32		26	V
Differential Input Voltage				32		26	V
Input Voltage			-0.3	32	-0.3	26	V
Input Current (V <sub>IN</sub> < -0.3 V) <sup>(3)</sup>				50		50	mA
Power Dissipation <sup>(4)</sup>	PDIP			1130		1130	mW
	CDIP			1260		1260	mW
	SOIC Package			800		800	mW
Output Short-Circuit to GND (One Amplifier) <sup>(5)</sup>		V* ≤ 15 V and T <sub>A</sub> = 25°C	Continuous		Continuous		
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)				260		260	°C
Soldering Information	Dual-In-Line Package	Soldering (10 seconds)		260		260	°C
		Vapor Phase (60 seconds)		215		215	°C
	Small Outline Package	Infrared (15 seconds)		220		220	°C
Storage temperature, T <sub>stg</sub>			-65	150	-65	150	°C

- (1) Refer to RETS124AX for LM124A military specifications and refer to RETS124X for LM124-N military specifications.
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/ Distributors for availability and specifications.
- (3) This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the op amps to go to the V\* voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than -0.3 V (at 25°C).
- (4) For operating at high temperatures, the LM324-N/LM324A/LM2902-N must be derated based on a 125°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 88°C/W which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM224-N/LM224A and LM124-N/LM124A can be derated based on a 150°C maximum junction temperature. The dissipation is the total of all four amplifiers—use external resistors, where possible, to allow the amplifier to saturate or to reduce the power which is dissipated in the integrated circuit.
- (5) Short circuits from the output to V\* can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V\*. At values of supply voltage in excess of 15 V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

### 6.2 ESD Ratings

			VALUE	UNIT
V <sub>(ESD)</sub>	Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 <sup>(1)</sup>	±250	V

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

### 6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

	MIN	MAX	UNIT
Supply Voltage (V* - V-): LM124-N/LM124A/LM224-N/LM224A/LM324-N/LM324A	3	32	V
Supply Voltage (V* - V-): LM2902-N	3	26	V
Operating Input Voltage on Input pins	0	V+	V
Operating junction temperature, T <sub>J</sub> : LM124-N/LM124A	-55	125	°C
Operating junction temperature, T <sub>J</sub> : L2902-N	-40	85	°C
Operating junction temperature, T <sub>J</sub> : LM224-N/LM224A	-25	85	°C
Operating junction temperature, T <sub>J</sub> : LM324-N/LM324A	0	70	°C

4 [Submit Documentation Feedback](#)

Copyright © 2000–2015, Texas Instruments Incorporated

Product Folder Links: [LM124-N](#) [LM224-N](#) [LM2902-N](#) [LM324-N](#)

## 6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC <sup>(1)</sup>	LM124-N / LM224-N	LM324-N / LM2902-N	UNIT
	J/CDIP	D/SOIC	
	14 PINS	14 PINS	
R <sub>θJA</sub> Junction-to-ambient thermal resistance	88	88	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).

## 6.5 Electrical Characteristics: LM124A/224A/324A

V<sup>+</sup> = 5.0 V, <sup>(1)</sup>, unless otherwise stated

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM124A			LM224A			LM324A			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	T <sub>A</sub> = 25°C <sup>(2)</sup>		1	2		1	3		2	3	mV
Input Bias Current <sup>(3)</sup>	I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = 25°C		20	50		40	80		45	100	nA
Input Offset Current	I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = 25°C		2	10		2	15		5	30	nA
Input Common-Mode Voltage Range <sup>(4)</sup>	V <sup>+</sup> = 30 V, (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 26 V), T <sub>A</sub> = 25°C	0		V <sup>+</sup> -1.5	0		V <sup>+</sup> -1.5	0		V <sup>+</sup> -1.5	V
Supply Current	Over Full Temperature Range, R <sub>L</sub> = ∞ On All Op Amps V <sup>+</sup> = 30 V (LM2902-N V <sup>+</sup> = 26 V)		1.5	3		1.5	3		1.5	3	mA
	V <sup>+</sup> = 5 V		0.7	1.2		0.7	1.2		0.7	1.2	
Large Signal Voltage Gain	V <sup>+</sup> = 15 V, R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ, (V <sub>O</sub> = 1 V to 11 V), T <sub>A</sub> = 25°C	50	100		50	100		25	100		V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	DC, V <sub>CM</sub> = 0 V to V <sup>+</sup> - 1.5 V, T <sub>A</sub> = 25°C	70	85		70	85		65	85		dB
Power Supply Rejection Ratio	V <sup>+</sup> = 5 V to 30 V, (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 5V to 26 V), T <sub>A</sub> = 25°C	65	100		65	100		65	100		dB
Amplifier-to-Amplifier Coupling <sup>(5)</sup>	f = 1 kHz to 20 kHz, T <sub>A</sub> = 25°C, (Input Referred)		-120			-120			-120		dB
Output Current	Source	V <sub>IN</sub> <sup>+</sup> = 1 V, V <sub>IN</sub> <sup>-</sup> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V, V <sub>O</sub> = 2 V, T <sub>A</sub> = 25°C	20	40		20	40		20	40	mA
	Sink	V <sub>IN</sub> <sup>-</sup> = 1 V, V <sub>IN</sub> <sup>+</sup> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V, V <sub>O</sub> = 2 V, T <sub>A</sub> = 25°C	10	20		10	20		10	20	
		V <sub>IN</sub> <sup>-</sup> = 1 V, V <sub>IN</sub> <sup>+</sup> = 0 V, V <sup>+</sup> = 15 V, V <sub>O</sub> = 200 mV, T <sub>A</sub> = 25°C	12	50		12	50		12	50	
Short Circuit to Ground	V <sup>+</sup> = 15 V, T <sub>A</sub> = 25°C <sup>(6)</sup>		40	60		40	60		40	60	mA
Input Offset Voltage	See <sup>(2)</sup>			4			4			5	mV
V <sub>OS</sub> Drift	R <sub>S</sub> = 0 Ω		7	20		7	20		7	30	μV/°C
Input Offset Current	I <sub>IN(+)</sub> - I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0 V			30			30			75	nA

- These specifications are limited to -55°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +125°C for the LM124-N/LM124A. With the LM224-N/LM224A, all temperature specifications are limited to -25°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +85°C, the LM324-N/LM324A temperature specifications are limited to 0°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +70°C, and the LM2902-N specifications are limited to -40°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ +85°C.
- V<sub>O</sub> = 1.4V, R<sub>S</sub> = 0 Ω with V<sup>+</sup> from 5 V to 30 V; and over the full input common-mode range (0 V to V<sup>+</sup> - 1.5 V) for LM2902-N, V<sup>+</sup> from 5 V to 26 V.
- The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
- The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V (at 25°C). The upper end of the common-mode voltage range is V<sup>+</sup> - 1.5 V (at 25°C), but either or both inputs can go to 32 V without damage (26 V for LM2902-N), independent of the magnitude of V<sup>+</sup>.
- Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.
- Short circuits from the output to V<sup>+</sup> can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V<sup>+</sup>. At values of supply voltage in excess of 15 V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.



**LM124-N, LM224-N  
LM2902-N, LM324-N**

SNOSC16D – MARCH 2000 – REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

**Electrical Characteristics: LM124A/224A/324A (continued)**

$V^+ = 5.0\text{ V}$ , <sup>(1)</sup>, unless otherwise stated

PARAMETER	TEST CONDITIONS		LM124A			LM224A			LM324A			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
I <sub>OS</sub> Drift	R <sub>S</sub> = 0 Ω			10	200		10	200		10	300	pA/°C
Input Bias Current	I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub>			40	100		40	100		40	200	nA
Input Common-Mode Voltage Range <sup>(4)</sup>	V <sup>+</sup> = 30 V, (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 26 V)		0	V <sup>+</sup> -2		0	V <sup>+</sup> -2		0	V <sup>+</sup> -2		V
Large Signal Voltage Gain	V <sup>+</sup> = 15 V (V <sub>O</sub> Swing = 1 V to 11 V), R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ		25			25			15			V/mV
Output Voltage Swing	V <sub>OH</sub>	V <sup>+</sup> = 30 V (LM2902-N, V <sup>+</sup> = 26 V)	R <sub>L</sub> = 2 kΩ		26		26		26		V	
		R <sub>L</sub> = 10 kΩ		27 28		27 28		27 28				
	V <sub>OL</sub>	V <sup>+</sup> = 5 V, R <sub>L</sub> = 10 kΩ	5 20		5 20		5 20		5 20		mV	
Output Current	Source	V <sub>O</sub> = 2 V	V <sub>IN</sub> <sup>+</sup> = +1V, V <sub>IN</sub> <sup>-</sup> = 0V, V <sup>+</sup> = 15V		10 20		10 20		10 20		mA	
	Sink		V <sub>IN</sub> <sup>+</sup> = +1V, V <sub>IN</sub> <sup>-</sup> = 0V, V <sup>+</sup> = 15V		10 15		5 8		5 8			

**6.6 Electrical Characteristics: LM124-N/224-N/324-N/2902-N**

$V^+ = +5.0\text{ V}$ , <sup>(1)</sup>, unless otherwise stated

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM124-N / LM224-N			LM324-N			LM2902-N			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ <sup>(2)</sup>		2	5		2	7		2	7	mV
Input Bias Current <sup>(3)</sup>	$I_{IN(+)} \text{ or } I_{IN(-)}$ , $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		45	150		45	250		45	250	nA
Input Offset Current	$I_{IN(+)} \text{ or } I_{IN(-)}$ , $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		3	30		5	50		5	50	nA
Input Common-Mode Voltage Range <sup>(4)</sup>	$V^+ = 30\text{ V}$ , (LM2902-N, $V^+ = 26\text{ V}$ ), $T_A = 25^\circ\text{C}$		0	$V^+ - 1.5$		0	$V^+ - 1.5$		0	$V^+ - 1.5$	V
Supply Current	Over Full Temperature Range $R_L = \infty$ On All Op Amps, $V^+ = 30\text{ V}$ (LM2902-N $V^+ = 26\text{ V}$ )		1.5	3		1.5	3		1.5	3	mA
	$V^+ = 5\text{ V}$		0.7	1.2		0.7	1.2		0.7	1.2	
Large Signal Voltage Gain	$V^+ = 15\text{ V}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , ( $V_O = 1\text{ V}$ to 11 V), $T_A = 25^\circ\text{C}$		50	100		25	100		25	100	V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	DC, $V_{CM} = 0\text{ V}$ to $V^+ - 1.5\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		70	85		65	85		50	70	dB
Power Supply Rejection Ratio	$V^+ = 5\text{ V}$ to 30 V (LM2902-N, $V^+ = 5\text{ V}$ to 26 V), $T_A = 25^\circ\text{C}$		65	100		65	100		50	100	dB
Amplifier-to-Amplifier Coupling <sup>(5)</sup>	$f = 1\text{ kHz}$ to 20 kHz, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Input Referred)		-120			-120			-120		dB

- (1) These specifications are limited to  $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$  for the LM124-N/LM124A. With the LM224-N/LM224A, all temperature specifications are limited to  $-25^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ , the LM324-N/LM324A temperature specifications are limited to  $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$ , and the LM2902-N specifications are limited to  $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ .
- (2)  $V_O = 1.4\text{ V}$ ,  $R_S = 0\ \Omega$  with  $V^+$  from 5 V to 30 V; and over the full input common-mode range (0 V to  $V^+ - 1.5\text{ V}$ ) for LM2902-N,  $V^+$  from 5 V to 26 V.
- (3) The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
- (4) The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V (at  $25^\circ\text{C}$ ). The upper end of the common-mode voltage range is  $V^+ - 1.5\text{ V}$  (at  $25^\circ\text{C}$ ), but either or both inputs can go to 32 V without damage (26 V for LM2902-N), independent of the magnitude of  $V^+$ .
- (5) Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.

6 [Submit Documentation Feedback](#)

Copyright © 2000–2015, Texas Instruments Incorporated

Product Folder Links: [LM124-N](#) [LM224-N](#) [LM2902-N](#) [LM324-N](#)





**LM124-N, LM224-N  
LM2902-N, LM324-N**

www.ti.com

SNOSC16D –MARCH 2000–REVISED JANUARY 2015

**Electrical Characteristics: LM124-N/224-N/324-N/2902-N (continued)**

$V^+ = +5.0V$ , <sup>(1)</sup>, unless otherwise stated

PARAMETER		TEST CONDITIONS	LM124-N / LM224-N			LM324-N			LM2902-N			UNIT			
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX				
Output Current	Source	$V_{IN}^{+} = 1\text{ V}$ , $V_{IN}^{-} = 0\text{ V}$ , $V^{+} = 15\text{ V}$ , $V_O = 2\text{ V}$ , $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	20	40		20	40		20	40		mA			
	Sink	$V_{IN}^{+} = 1\text{ V}$ , $V_{IN}^{-} = 0\text{ V}$ , $V^{+} = 15\text{ V}$ , $V_O = 2\text{ V}$ , $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	10	20		10	20		10	20		mA			
		$V_{IN}^{-} = 1\text{ V}$ , $V_{IN}^{+} = 0\text{ V}$ , $V^{+} = 15\text{ V}$ , $V_O = 200\text{ mV}$ , $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	12	50		12	50		12	50		μA			
Short Circuit to Ground		$V^{+} = 15\text{ V}$ , $T_A = 25^{\circ}\text{C}^{(6)}$		40	60		40	60		40	60	mA			
Input Offset Voltage		See <sup>(2)</sup>			7			9			10	mV			
$V_{OS}$ Drift		$R_S = 0\ \Omega$			7			7			7	μV/°C			
Input Offset Current		$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$ , $V_{CM} = 0\text{ V}$			100			150			45	200	nA		
$I_{OS}$ Drift		$R_S = 0\ \Omega$			10			10			10	pA/°C			
Input Bias Current		$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$			40	300		40	500		40	500	nA		
Input Common-Mode Voltage Range <sup>(4)</sup>		$V^{+} = 30\text{ V}$ , (LM2902-N, $V^{+} = 26\text{ V}$ )	0		$V^{+}-2$	0		$V^{+}-2$	0		$V^{+}-2$	V			
Large Signal Voltage Gain		$V^{+} = 15\text{ V}$ ( $V_O$ Swing = 1V to 11V), $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25			15			15			V/mV			
Output Voltage Swing	$V_{OH}$	$V^{+} = 30\text{ V}$ (LM2902-N, $V^{+} = 26\text{ V}$ )				26			22			V			
	$V_{OL}$	$V^{+} = 5\text{ V}$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$				27	28		23	24					
					5	20		5	20		5	100	mV		
Output Current	Source	$V_O = 2\text{ V}$				$V_{IN}^{+} = 1\text{ V}$ , $V_{IN}^{-} = 0\text{ V}$ , $V^{+} = 15\text{ V}$	10	20		10	20		10	20	mA
	Sink					$V_{IN}^{-} = 1\text{ V}$ , $V_{IN}^{+} = 0\text{ V}$ , $V^{+} = 15\text{ V}$	5	8		5	8		5	8	mA

(6) Short circuits from the output to  $V^+$  can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of  $V^+$ . At values of supply voltage in excess of 15 V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

## Anexo IV. Hoja de características TMA-0512D

**TRACO  
POWER**

## DC/DC Converters

TMA Series, 1 Watt

### Features

- ◆ Single-in-line (SIP) package
- ◆ Single and dual output models
- ◆ I/O isolation 1'000 VDC
- ◆ High efficiency up to 81%
- ◆ Operating temp. range  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$
- ◆ Industry standard pinout
- ◆ 100% Burn-in (8 h)
- ◆ Lead free design, RoHS compliant
- ◆ 3-year product warranty



The TMA series are miniature, isolated 1 W DC/DC-converters in a Single-in-Line package (SIP). Requiring only 1.2 cm<sup>2</sup> board space they offer the ideal solution in many space critical applications for board level power distribution. The use of SMD-technology makes it possible to offer a product with high performance at low cost.

Models				
Ordercode	Input voltage	Output voltage	Output current max.	Efficiency typ.
TMA 0505S	5 VDC $\pm$ 10%	5 VDC	200 mA	71 %
TMA 0512S		12 VDC	80 mA	78 %
TMA 0515S		15 VDC	65 mA	78 %
TMA 0505D		$\pm$ 5 VDC	$\pm$ 100 mA	72 %
TMA 0512D		$\pm$ 12 VDC	$\pm$ 40 mA	78 %
TMA 0515D		$\pm$ 15 VDC	$\pm$ 35 mA	79 %
TMA 1205S	12 VDC $\pm$ 10%	5 VDC	200 mA	73 %
TMA 1212S		12 VDC	80 mA	80 %
TMA 1215S		15 VDC	65 mA	80 %
TMA 1205D		$\pm$ 5 VDC	$\pm$ 100 mA	74 %
TMA 1212D		$\pm$ 12 VDC	$\pm$ 40 mA	81 %
TMA 1215D		$\pm$ 15 VDC	$\pm$ 35 mA	81 %
TMA 1505S	15 VDC $\pm$ 10%	5 VDC	200 mA	73 %
TMA 1512S		12 VDC	80 mA	80 %
TMA 1515S		15 VDC	65 mA	80 %
TMA 1505D		$\pm$ 5 VDC	$\pm$ 100 mA	74 %
TMA 1512D		$\pm$ 12 VDC	$\pm$ 40 mA	81 %
TMA 1515D		$\pm$ 15 VDC	$\pm$ 35 mA	81 %
TMA 2405S	24 VDC $\pm$ 10%	5 VDC	200 mA	71 %
TMA 2412S		12 VDC	80 mA	78 %
TMA 2415S		15 VDC	65 mA	79 %
TMA 2405D		$\pm$ 5 VDC	$\pm$ 100 mA	72 %
TMA 2412D		$\pm$ 12 VDC	$\pm$ 40 mA	79 %
TMA 2415D		$\pm$ 15 VDC	$\pm$ 35 mA	80 %

### Input Specifications

Input current no load /full load	5 Vin models: 30 mA / 260 mA typ. 12 Vin models: 12 mA / 110 mA typ. 15 Vin models: 12 mA / 100 mA typ. 24 Vin models: 7 mA / 55 mA typ.
Surge voltage (1 sec. max.)	5 Vin models: 9 V max. 12 Vin models: 18 V max. 15 Vin models: 21 V max. 24 Vin models: 30 V max.
Reverse voltage protection	0.3 A max.
Reflected input ripple current	can be reduced by ext. 1–3.3 $\mu$ F polyester film capacitor
Input filter	internal capacitors

### Output Specifications

Voltage set accuracy	$\pm 3$ %
Voltage balance (dual output models)	$\pm 1$ % max.
Regulation	$\pm 1.2$ % / 1 % change Vin $\pm 10$ % max.
Ripple and noise (20 MHz Bandwidth)	100 mVp-p typ.
Temperature coefficient	$\pm 0.02$ %/K
Short circuit protection	limited 1 sec. max.
Capacitive load	220 $\mu$ F max. 100 $\mu$ F max.

### General Specifications

Temperature ranges	– Operating – Case temperature – Storage	–40°C to +85°C +95°C max. –40°C to +105°C
Humidity (non condensing)		95 % rel H max.
Reliability, calculated MTBF (MIL-HDBK-217F, at +25°C, ground benign)		>2'000'000 h
Isolation voltage (input/output)		1'000 VDC
Isolation capacitance (input/output)		60 pF typ.
Isolation resistance (input/output)		>1'000 Mohm
Switching frequency		100 kHz typ. (frequency modulation)
Frequency change over line and load		$\pm 30$ % max.
Environmental compliance	– Reach – RoHS	<a href="http://www.tracopower.com/products/reach-declaration.pdf">www.tracopower.com/products/reach-declaration.pdf</a> RoHS directive 2011/65/EU

**Application note:** [www.tracopower.com/products/tma-application.pdf](http://www.tracopower.com/products/tma-application.pdf)

All specifications valid at nominal input voltage, full load and +25°C after warm-up time unless otherwise stated.

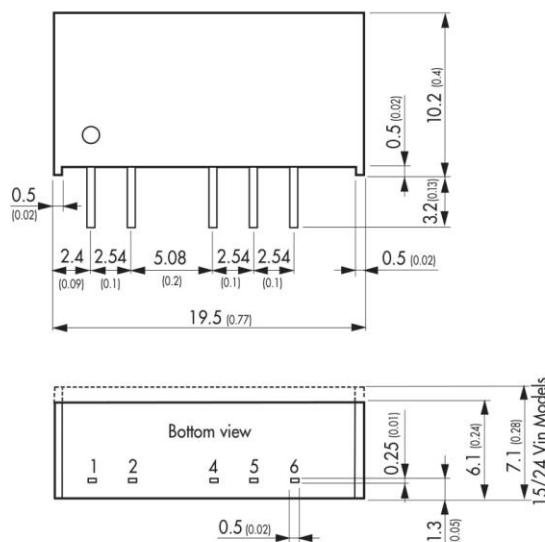
**TRACO  
POWER**

**DC/DC Converters**  
**TMA Series** **1 Watt**

### Physical Specifications

Casing material	non conductive black plastic (UL 94V-0 rated)	
Package weight	Single output models:	2.1 g (0.07 oz)
	Dual output models:	2.6 g (0.09 oz)
Potting material	Epoxy	
Soldering temperature	max. 265°C / 10 sec	

### Outline Dimensions mm (inches)



Pin-Out		
Pin	Single	Dual
1	+Vin (Vcc)	+Vin (Vcc)
2	-Vin (GND)	-Vin (GND)
4	-Vout	-Vout
5	No pin	Common
6	+Vout	+Vout

Tolerances  $\pm 0.25$  ( $\pm 0.01$ )  
Pin pitch tolerances  $\pm 0.13$  ( $\pm 0.005$ )  
pins  $\pm 0.05$  ( $\pm 0.002$ )

Specifications can be changed without notice! Make sure you are using the latest documentation, downloadable at [www.tracopower.com](http://www.tracopower.com)

**TRACO  
POWER**

[www.tracopower.com](http://www.tracopower.com)

Rev. February 11, 2014  
Page 3 of 3

## Anexo V. Código programación lectura frecuencia en Arduino

```
// Definimos variables
#define pin 3 //Definimos el pin en el que se desea medir la frecuencia
#define nmuestras 4 //Numero de muestras que se desean tomar para calcular
la frecuencia

unsigned int frecuencia[nmuestras]; //Definimos los arrays para almacenar
los datos de cada muestra
unsigned int x;
unsigned int t;
unsigned int tttotal;
double tpromedio;
double f;
double v;
double factordoppler=19.49; //factor proveniente de la ecuación (17)

void setup() {
    // Establecemos la configuración inicial y el pin seleccionado como
    entrada
    Serial.begin(115200);
    pinMode(pin, INPUT);
}

void loop() {
    noInterrupts(); // Lo utilizamos para que se centre directamente en medir
    los tiempos correctamente
    pulseIn(pin, HIGH); // sin que haya ningun tipo de interrupción hasta que
    volvamos a activarlos
    t = 0;
    tttotal = 0;
    for (x = 0; x < nmuestras; x++)
    {
        t = pulseIn(pin, HIGH); //Tomamos los tiempos que tardan en cambiar de
        estado y los sumamos para
        t += pulseIn(pin, LOW); //obtener el periodo de la señal en
        microsegundos
        tttotal += t;
        frecuencia[x] = t; // Recogemos el valor obtenido y lo introducimos en
        el array
    }
    interrupts();
    tpromedio = tttotal/nmuestras; //Obtenemos el periodo promedio de la señal
    f = 1000000/tpromedio; // Obtenemos la frecuencia de la señal pasando
    primero el tiempo a segundos
    v = f/factordoppler;
    Serial.print(f);
    Serial.print("Hz : ");
    Serial.print(v);
    Serial.print("km/h\r\n ");
}
}
```

## Anexo VI. Código de programación final.

```
#define pin 2 //Definimos el pin en el que se desea medir la
frecuencia
unsigned long timeout=17103; //Tiempo maximo como limite marcado
para final de detección determinado por la frecuencia
minima
float a;          //Para 2Km/h ==> T= 1/(3*19.49) = 0.017103 s
float aa;
float amedia;
float anorm;
float g;
unsigned int x;
unsigned long t;
unsigned long tttotal;
float amplitud[200];
float tpromedio;
float f;
float v;
float factordoppler=19.49; //factor proveniente de la ecuacion (17)
unsigned int sumx;
unsigned int sumx2;
float sumxy;
float m;

void setup() {
    // Establecemos la configuracion inicial y el pin seleccionado
    como entrada
    Serial.begin(115200);
    pinMode(pin, INPUT);
}

void loop() {
    pulseIn(pin, HIGH); // sin que haya ningun tipo de interrupción
    hasta que volvamos a activarlos
    t = 0;
    x = 1;
    a = 0;
    aa = 0;
    tttotal = 0;
    //Iniciamos la toma de muestras
    while(t < timeout){ //Comparamos el tiempo del periodo con el
    tiempo de espera maximo
        noInterrupts(); // Lo utilizamos para que se centre directamente
        en medir los tiempos correctamente
        t = pulseIn(pin, LOW, timeout); //obtener el periodo de la señal
        en microsegundos
        interrupts();
        if(t==0){          // En caso de superar el timeout que salga del
        programa
            break;
        }
        tttotal += t;
        a = analogRead(A7)*5.0/1024;
        aa += a;
        amplitud[x] = a;
        x++;
    }
    //Fin de toma de muestras
```

```

tpromedio = tttotal/x; //Obtenemos el periodo promedio de la señal
f = 500000/tpromedio; // Obtenemos la frecuencia de la señal
pasando primero el tiempo a segundos
amedia = aa/x;
if( x >= 15 ){
    if(( f >= 60 ) && ( f <= 140 ) && ( amedia > 1.40 )){
        v = f/factorDoppler;

        //Calculamos la pendiente de los datos para ver si va o
viene
        sumx=0;
        sumx2=0;
        sumxy=0;
        m = 0;
        for(int i=1; i<x; i++){
            sumx += i;
            sumx2 += i * i;
            sumxy += i * amplitud[i];
        }
        m = 1.0*((x-1)*sumxy-sumx*aa)/((x-1)*sumx2-sumx*sumx);
//Calculo de la pendiente utilizando la ecuacion (33)
//Fin de calculo de la pendiente

        //Normalizamos la amplitud para poder compararlas
        g = 100*(f-60)+4000;
        anorm = amedia/g*4000;          //Calculo de la amplitud
normalizada utilizando la formula (35)
//Fin normalizar amplitud

        // Mostramos por pantalla todos los datos de la detección
        if(m<0){
            Serial.print(" Sale ");
        }else{
            Serial.print(" Entra ");
        }
        Serial.print(" Numero de muestras: ");
        Serial.print(x);
        Serial.print(" Amplitud: ");
        Serial.print(amedia);
        Serial.print(" Amplitud normalizada");
        Serial.print(anorm);
        Serial.print(" ");
        Serial.print(f);
        Serial.print("Hz : ");
        Serial.print(v);
        Serial.print("km/h\r\n ");
        delay(6000);
    }
}
}

```

